

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

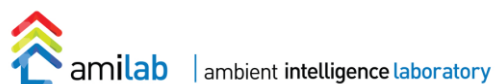
**PROPUESTA DE UNA INTERFAZ DE USUARIO ISOTÓNICA-
ISOMÉTRICA PARA CONTROL DE SISTEMAS DE REALIDAD MIXTA
PARA LA EDUCACIÓN**

César Andrés Ayala Cajas

Julio 2015

Tutor:

Xavier Alamán Roldán



Resumen

En el presente trabajo de fin de máster se realizó el diseño, implementación y evaluación de una interfaz de usuario tangible para la educación mediante realidad mixta llamada *FlyStick*.

En primer lugar se han revisado proyectos relacionados con experiencias del uso de tangibles y mundos virtuales como material de apoyo en la educación desde el punto de vista del constructivismo. Adicionalmente se revisaron proyectos relacionados con interfaces de usuario para captar la interacción del usuario sobre objetos tridimensionales.

En segundo lugar, se diseñó una experiencia educativa en mundos virtuales mediante el desarrollo de una interfaz de usuario tangible que permite la interacción con objetos virtuales en seis grados de libertad teniendo en cuenta dos tipos de contracciones musculares, ya sea mediante la fuerza o el desplazamiento. La combinación de estas interacciones permite elaborar experiencias de pedagogía constructivista, gracias a la percepción de participación directa en el mundo virtual. En el presente proyecto la experiencia propuesta está orientada al aprendizaje de conceptos abstractos, concretamente a la enseñanza de las secciones cónicas en geometría.

Para evaluar la tecnología de realidad mixta desarrollada con usuarios reales se contó con la participación de estudiantes y profesores de la institución de educación secundaria “Florida Secundaria” ubicada en Valencia (España) para quienes se diseñaron dos actividades educativas. La primera actividad emplea la interfaz tangible *FlyStick* con el objetivo de enseñar geometría. La segunda actividad persigue el mismo objetivo, pero mediante una metodología tradicional. Estas actividades fueron evaluadas cuantitativamente en función a los conocimientos adquiridos y cualitativamente en cuanto a la experiencia percibida por los participantes.

Los resultados empíricos obtenidos sugirieron que las experiencias en realidades mixtas pueden ser significativas para el estudiante, logrando crear conocimiento a largo plazo.

Palabras clave: Educación, realidad mixta, tangible, isotónico, isométrico, mundo virtual, constructivismo.

Abstract

The present project is the design, implementation and evaluation of a tangible user interface for education using mixed reality; the tangible captures both isotonic and isometric user interactions. Through the adaptation of middleware, these interactions are reflected as actions within a virtual world, the proposed interface was given the name of *FlyStick*.

Projects related to experiences of using virtual worlds and tangible interfaces to support in education from the standpoint of constructivism, were reviewed. Also projects related with interfaces to capture user interaction on a device were reviewed.

Consequently, an educational experience in virtual worlds was developed through a tangible user interface that allows interaction with virtual objects in six degrees of freedom. This interaction, takes into account two types of muscle contractions, either by force or displacement. The combination of these interactions will allow the development of experiences based on constructivist pedagogy, due to the perception of direct involvement with the virtual world. In this project, the experience proposal is aimed to teaching abstract concepts, namely teaching geometry conic sections.

In order to evaluate the mixed reality technology developed with real users, two educational activities were designed with the collaboration of students and teachers from "Florida High School" located in Valencia (Spain). The first activity uses FlyStick as tangible interface for virtual worlds with the aim of teaching geometry. The second activity pursues the same objective, but using a traditional teaching methodology. These activities were evaluated quantitatively according to the acquired knowledge and qualitatively by using a user experience questionnaire. The empirical results obtained extend the range of application of constructivist methodology, suggesting that experiences in mixed realities may also be significant for the student, even creating long-term knowledge.

Key words: Education, mixed reality, tangible interfaces, isotonic, isometric, virtual world, constructivism, user interface.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi tutor Xavier, por el apoyo, dedicación y dirección que ha brindado a este trabajo. Gracias Xavier por la confianza ofrecida desde el principio.

De igual manera, quiero expresar mi agradecimiento a Juan por el esfuerzo, orientación y su tiempo. Y con cuyo trabajo siempre estaré en deuda.

Gracias también a la institución de educación secundaria “Florida Secundaria”, los estudiantes y profesores. Y en especial a Laura, por su apoyo indispensable para la realización de este trabajo.

Gracias a mis amigos y roomies que siempre me han prestado su apoyo humano en los momentos difíciles de este trabajo.

Pero sobre todo gracias a mi familia por su fuerza y energía a la distancia.

Andrés Ayala

07 de Julio 2015

1 TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
1.1	Motivación y Objetivos	1
1.2	Estructura de la memoria	2
2.	Estado del Arte.....	3
2.1.	Educación mediante tangibles	3
2.2.	Realidad virtual en la educación	4
2.3.	Dispositivos de interacción con objetos 3D	7
2.4.	Conclusiones del estado del arte	9
3.	Propuesta de un tangible de realidad mixta.....	11
3.1	Diseño	12
3.1.1.	Mundo virtual.....	12
3.1.2.	Interfaz tangible.....	13
3.1.3.	Middleware.....	15
3.2	Implementación.....	15
3.2.1	Interfaz tangible.....	17
3.2.2	Middleware.....	19
3.3.3	Mundo Virtual.....	21
4.	Evaluación	27
4.1	Diseño	27
4.1.1.	Actividad en realidad mixta.....	27
4.1.2.	Actividad con método tradicional.....	29
4.1.3.	Selección de participantes.....	30
4.1.4.	Preparación del laboratorio.....	31
4.2	Sesiones	31
4.2.1.	Sesión introductoria	31
4.2.2.	Sesión de aprendizaje en realidad mixta.....	32
4.2.3.	Sesión de aprendizaje con método tradicional.....	34

4.2.4.	Sesión de post-evaluación	35
4.3	Análisis de resultados	35
4.4	Discusión de los resultados	42
5.	Conclusiones y Trabajo futuro	43
5.1	Conclusiones.....	43
5.2	Trabajo futuro	44
6.	Anexos	49
A.	Ejemplo de script lsl para interpretar señales del middleware.....	49
B.	Test de introducción a mundos virtuales	53
C.	Test de usabilidad flystick.....	57
D.	Test de cónicas	61
E.	Preguntas de entrevista semiestructurada con el docente	67

2 TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Secciones cónicas resultantes de la intersección de un plano con un cono: parábola (1), elipse y circunferencia (2) e hipérbola (3).....	12
Figura 2: Diseño esquemático de FlyStick.....	14
Figura 3: Arquitectura basada en VirtualTouch [38].....	16
Figura 4: Diseño del tangible FlyStick.	18
Figura 5: FlyStick ensamblado.	18
Figura 6: Función para cálculo de navegación basada en el algoritmo AN4248.	19
Figura 7: Función para cálculo de aceleración eliminando la gravedad.	20
Figura 8: Elementos virtuales para la enseñanza de cónicas.	22
Figura 9: Diagrama de estados para el plano virtual.....	23
Figura 10: Diagrama de estados para la pizarra virtual.....	25
Figura 11: Estudiantes interactuando con mundos virtuales en una sesión introductoria.....	32
Figura 12: Estudiante realizando una sección cónica en realidad mixta por medio de FlyStick.....	33
Figura 13: Estudiantes estudiando las secciones cónicas de forma tradicional.	34
Figura 14: Estudiante realizando el cuestionario de evaluación de secciones cónicas.....	35
Figura 15: Resultado del test de usabilidad de realidad mixta.....	37
Figura 16: Evaluación de conocimientos adquiridos con realidad mixta.....	38
Figura 17: Evaluación de conocimientos adquiridos con realidad mixta por nivel..	38
Figura 18: Evaluación de conocimientos adquiridos con metodología tradicional...	39
Figura 19: Evaluación de conocimientos con realidad mixta (grupo A) vs método tradicional (grupo B).	39
Figura 20: Post-evaluación entre realidad mixta (Grupo A) vs método tradicional (grupo B).....	40
Figura 21: Comparación de resultados del grupo de control en el tiempo.....	40

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

“Nosotros damos forma a nuestras herramientas y luego nuestras herramientas nos dan forma a nosotros” escribió Marshall MacLuhan en 1964 refiriéndose a los cambios en el comportamiento del ser humano tras la invención de la televisión. Una visión de la tecnología que no puede ser más acertada y es la razón por la cual es necesario crear herramientas enfocadas a la transformación de la educación. En esta idea, el presente trabajo de fin de máster está centrado en el uso de la tecnología para mejorar el aprendizaje.

El objetivo del presente trabajo de fin de máster es proponer el uso de la realidad mixta como material didáctico, que permita a los estudiantes comprender conceptos abstractos de forma interactiva y motivada. La enseñanza de estos conceptos mediante métodos de enseñanza tradicionales presenta un reto tanto para el educador como para el estudiante.

Los componentes que refuerzan de manera efectiva el aprendizaje en este proyecto son la estrecha relación entre la acción y el área de dominio de aprendizaje, donde la posibilidad de explorar un fenómeno desde diferentes puntos de vista es el factor principal para la asimilación de conocimiento por parte del estudiante. Esta interacción permite convertir a un estudiante en el actor principal en su proceso de formación. Vygotsky [1] comenta que al ofrecer la oportunidad de tener nuevas experiencias mediante la exploración, los estudiantes construyen su propio aprendizaje como una aproximación al proceso de construccionismo.

Para ello, se desarrollará un prototipo de interfaz tangible que permita la interacción intuitiva con elementos en mundos virtuales. Esta fusión de objetos reales dentro de mundos virtuales es conocida como un tipo de realidad mixta denominada “virtualidad aumentada” por Milgram *et al.* [2], donde objetos físicos son integrados dinámicamente en un entorno virtual permitiendo interacciones en tiempo real.

La naturalidad de uso de la interfaz tangible a desarrollar se conseguirá mediante un diseño que considere la forma en que los seres humanos transmiten información a un dispositivo a través de sus extremidades.

1.2 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

El presente proyecto se ha estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 2 - Estado de arte: en este capítulo se hace una revisión de la literatura relacionada con el tema propuesto en el presente trabajo. Está estructurado en tres apartados: el primer apartado trata sobre el uso de tangibles en la educación; el segundo apartado trata sobre aplicaciones de realidad mixta aplicadas a la educación; finalmente el tercer apartado trata sobre interfaces para la interacción 3D con objetos virtuales.

Tras este estudio del estado del arte, se presentan las aportaciones y mejoras que aporta nuestro prototipo en relación a las características relevantes de los trabajos expuestos.

Capítulo 3 – Propuesta de un prototipo tangible de realidad mixta: este capítulo plantea una propuesta basada en las mejoras posibles que se han identificado en el capítulo de estado del arte. Se encuentra dividido en un apartado de diseño del prototipo y en un apartado de la implementación realizada. Se explica la arquitectura utilizada y el diseño del mundo virtual que se han realizado.

Capítulo 4 – Evaluación: en este capítulo se describen las actividades y sesiones de experimentación que se llevaron a cabo. Los resultados obtenidos son analizados y discutidos.

Capítulo 5 – Conclusiones y trabajos futuros: finalmente en este capítulo se describen las conclusiones finales extraídas tras realizar la implementación y evaluación del prototipo de realidad mixta, y se proponen posibles mejoras como trabajo futuro.

2. ESTADO DEL ARTE

Como se menciona en el capítulo de introducción, el presente trabajo se enfoca en las interfaces de usuario tangibles para la educación a través de mundos virtuales. En este capítulo se revisarán investigaciones referentes a mundos virtuales en la educación, la educación mediante tangibles y las formas de interacción existentes con mundos virtuales.

2.1. EDUCACIÓN MEDIANTE TANGIBLES

La idea de que los objetos físicos podrían desempeñar un papel importante en el proceso de aprendizaje es una idea relativamente nueva. Hasta el siglo XIX, la educación formal se centró casi exclusivamente en conferencias y recitaciones. Uno de los primeros defensores del "aprendizaje práctico" fue el educador suizo Johann Heinrich Pestalozzi [3], quien afirmó que los estudiantes necesitan aprender a través de sus sentidos mediante la actividad física. Froebel [4], influenciado por las ideas de Pestalozzi [3], desarrolló 20 objetos físicos para que los niños los utilizaran como material de aprendizaje. Todos ellos fueron diseñados para que se adaptasen al entorno en que se hallaban los estudiantes.

El constructivismo es una teoría basada en las teorías psicológicas, ontológicas y epistemológicas de Piaget [5]. Expone que las personas construyen su visión del mundo en base a su experiencia y esa experiencia pesa sobre cualquier nueva información que encuentren.

Sobre la base de las teorías constructivistas de Piaget [5], Papert [6] desarrolló el marco de aprendizaje del construccionismo, describiendo al construccionismo como un proceso de aprendizaje mediante la realización de actividades que involucren la construcción de objetos.

Una de estas metodologías es la propuesta por Montessori [7], quien es la precursora de la enseñanza mediante tangibles. Esta metodología se basa en utilizar objetos físicos en la educación, tales como barras de colores, pelotas, tokens,

etc. Basándose en esta metodología Zuckerman *et al.* [8] utilizan tangibles digitales específicamente diseñados para la resolución de problemas abstractos, obteniendo resultados positivos debido a que ayudan a los estudiantes a resolver problemas análogos reales. Marshall *et al.* [9] observaron en investigaciones que emplean el uso de manipulativos en el aprendizaje que el usuario crea un vínculo con el tangible. Este vínculo entre actividades físicas y cognitivas podría facilitar ciertas formas de cognición. Adicionalmente, las interfaces tangibles son más intuitivas y accesibles, especialmente para estudiantes de educación primaria. También demuestran su utilidad en incentivar el trabajo colaborativo entre estudiantes.

En el experimento realizado por Chester [10] participaron dos grupos de estudiantes de secundaria. La actividad educativa del grupo experimental utilizó manipulativos para enseñar los conceptos presentados en la materia de matemáticas, mientras que el maestro del grupo de control utilizó dibujos y diagramas para enseñar los mismos conceptos. El análisis de covarianza reveló que el grupo experimental que utilizó los manipulativos registró significativamente mayor rendimiento en matemáticas en las puntuaciones de los exámenes respecto al grupo control.

Hoy en día los materiales manipulativos están bien establecidos en la educación, sobre todo en los primeros años de educación primaria. Sin embargo en las aulas de educación secundaria la enseñanza se lleva a cabo en la mayoría de casos mediante charlas, donde lo más cercano a una interacción tangible es la realizada con una tiza en la pizarra.

2.2. REALIDAD VIRTUAL EN LA EDUCACIÓN

De acuerdo con la psicóloga del desarrollo educativo Edith Ackermann [11], el constructivismo, descrito como la teoría de imaginar nuevos entornos de aprendizaje, y el construccionismo como una teoría del aprendizaje situado y pragmático, pueden ser extensibles a experiencias en mundos virtuales.

La pedagogía constructivista se ha seleccionado como el marco de este trabajo por varias razones: (i) La teoría constructivista se encuentra actualmente en un estado de vanguardia en la educación, por estar ampliamente aceptada como una teoría establecida y madura [12], y (ii) la teoría constructivista es fácilmente aplicable en las instituciones educativas que utilizan como material didáctico los mundos

virtuales con el objetivo de crear experiencias de aprendizaje reflexivo [12]. Duncan *et al.* [13] afirman que los mundos virtuales son una herramienta importante en las prácticas educativas modernas puesto que proporcionan socialización, entretenimiento y un laboratorio para el trabajo colaborativo.

Bartle [14] define un mundo virtual como un entorno virtual donde varias personas pueden interactuar simultáneamente. Una de las principales características de los mundos virtuales es la persistencia, debido a que el entorno existe y evoluciona incluso cuando no hay personas interactuando sobre el mismo. Ghanbarzadeh *et al.* [15] amplía esta definición indicando que un mundo virtual tridimensional (3DVW) es un entorno 3D virtual simulado electrónicamente por un ordenador donde los usuarios pueden explorar, habitar, comunicarse e interactuar a través de avatares, que son representaciones gráficas de los usuarios. Second Life¹ es un buen ejemplo de un 3DVW.

De acuerdo con Dickey [16] y Hew y Chung [17], los mundos virtuales orientados a la educación pueden contener una o más de las siguientes características: la ilusión de estar en un espacio 3D, la capacidad de construir e interactuar con los objetos 3D, la representación digital de los estudiantes en forma de avatar y la capacidad de comunicarse con otros estudiantes en los mundos virtuales. Estos mundos virtuales pueden ser estructurados para simulaciones y juegos, cuyo entorno incentive la participación abierta de los usuarios y la creación de sus propios objetos.

En 1994 Milgram y Kishino [2] definieron a la realidad mixta como *cualquier espacio entre los extremos del continuo de la virtualidad*. Este continuo de la virtualidad se extiende desde el mundo completamente real hasta el entorno completamente virtual, encontrándose entre medio de estos la realidad aumentada y la realidad virtual. En este apartado se expondrán trabajos que traten sobre la realidad mixta aplicada a la educación, ya que en el presente trabajo fin de master se emplea la virtualidad aumentada para la enseñanza de conceptos abstractos mediante la combinación interfaces tangibles con mundos virtuales.

Freina y Ott [19] argumentan que la principal motivación del uso de realidades mixtas en la educación es el aprovechar las oportunidades de vivir y experimentar situaciones a las que no se puede acceder físicamente. Los autores definen que los límites en la educación tradicional se rompen a la hora de utilizar un entorno

¹ <https://secondlife.com/>

virtual, como por ejemplo: viajar en el tiempo, experimentando diferentes periodos históricos [20]; manipular entornos a voluntad, por ejemplo, explorando el sistema solar moviendo libremente los planetas [21]; experimentar fenómenos inusuales, por ejemplo, enfrentandose a un incendio sin tener que estar expuesto a las tensiones físicas y psicológicas [22]; o practicar actividades complejas, por ejemplo, realizando cirugías delicadas sin arriesgar la vida de un paciente real [23]. Freina y Ott [19] concluyen que la experiencias en realidades mixtas permiten tener una sensación directa de objetos y eventos que están físicamente fuera de nuestro alcance, apoya la formación en un entorno seguro para evitar posibles peligros reales y, gracias al enfoque de juego, aumenta la participación del alumno y la motivación. Sin embargo es necesaria la supervisión constante de un profesor para mediar y regular el uso de las herramientas, tanto hardware como software.

Los investigadores de STEM [24] han estudiado el uso de interfaces hápticas en la educación con resultados favorables al proporcionar una experiencia de aprendizaje práctico que ayuda al aprendizaje de conceptos científicos complejos. Una interfaz háptica es aquella que logra transmitir una señal al ser humano mediante el sentido del tacto.

Otro estudio referente a interfaces hápticas realizado por Jones *et al.* [25] sugiere que el uso de dispositivos hápticos y simulaciones virtuales puede llevar a un nivel más profundo de procesamiento del conocimiento abstracto. Sin embargo, los dispositivos hápticos no han sido adoptados ampliamente en la educación debido al costo de la tecnología y al tiempo necesario para formar a los profesores sobre cómo utilizar de manera eficaz un dispositivo de estas características.

Muñoz *et al.* [26] propusieron un sistema que emplea tecnologías como google earth y street view, para usarlas como mundos virtuales para la enseñanza de arquitectura. Otro trabajo en esta área lo realizaron Merchant *et al.* [27], quienes sugieren que el aprendizaje mediante simulaciones virtuales puede arrojar mejores resultados si se utilizan instrumentos tangibles para abarcar todo el espectro constructivista.

La realidad mixta a través de dispositivos tangibles (virtualidad aumentada), representa un enfoque cada vez más popular para el diseño de sistemas para una variedad de dominios de aplicación, incluyendo el aprendizaje, la participación colaborativa y el entretenimiento [9]. Ishii [27] es uno de los pioneros en el uso de

las interfaces tangibles, describiendo a un tangible como la representación física de un elemento digital.

Spicer [28] comenta que los manipulativos virtuales ofrecen oportunidades para la construcción de conocimiento y comprenden una amplia gama de posibilidades como simulaciones y tutoriales.

Utilizando esta visión de realidad mixta, Mateu et al. [29] obtuvieron resultados prometedores al utilizar tangibles para representar conceptos abstractos. En el proyecto VirtualTouch, estudiantes de informática aprendieron algoritmos de ordenación a través de cubos que simulaban elementos de una tabla.

2.3. DISPOSITIVOS DE INTERACCIÓN CON OBJETOS 3D

Con el fin de ser capaz de manipular objetos en 3D de forma natural se necesitan al menos seis grados de libertad (DOF 6): tres para para la translación sobre los ejes X,Y,Z y tres para la rotación sobre los ejes. Zhai [29] expone las dificultades en realizar un dispositivo estándar de 6 DOF. En primer lugar están el coste de fabricación del tangible, y la necesidad de creatividad por parte diseñador para hacerlo manipulable. En segundo lugar, y quizás más importante, incluso si pudiéramos hacer fácilmente cualquier dispositivo no hay más que un conocimiento muy limitado sobre qué propiedades debe tener un buen controlador de 6 DOF.

Mine [30] diseñó un dispositivo de inmersión para trabajar dentro de un mundo virtual mediante varias técnicas de interacción, entre las cuales se destaca un mando a distancia (widget de mano) cuyas características permiten la inmersión en el espacio virtual al crear una percepción de interacción directa con un objeto virtual. Su característica principal es que este dispositivo está diseñado para la manipulación con dos manos: cada mano interactúa con un sensor de 6DOF y provee al usuario de un visor estereoscópico capaz de percibir movimientos en 3D. Sin embargo el autor comenta que ha tenido problemas en cuanto a la utilización del dispositivo ya que el movimiento no resultaba intuitivo para los usuarios, debido posiblemente a interferencias magnéticas que afectaban a los sensores. Adicionalmente, el autor destacó el alto costo del hardware debido a la utilización de varios sensores de posición.

Otro trabajo similar trata sobre el sistema de 3-Draw desarrollado por Sachs *et al.* [31], que se diseñó para ser utilizado con las dos manos del usuario: cada mano controla un dispositivo con un sensor de seis grados de libertad para interactuar con una imagen en una pantalla convencional. En el sistema 3-Draw los usuarios eran capaces de dibujar curvas tridimensionales mediante la combinación de ambos dispositivos. Sachs informó que los usuarios encontraron la interfaz natural y rápida, y que el uso simultáneo de dos manos proporcionaba retroalimentación kinestésica que permitió que los usuarios se sintieran como si estuvieran sosteniendo los objetos que aparecían en la pantalla.

JDCAD es un sistema de modelado 3D interactivo diseñado y construido por Liang [32]. Utiliza un sensor de entrada de seis grados de libertad combinado con un casco con una pantalla. Liang mostró resultados prometedores al comparar JDCAD con los sistemas convencionales a través de dispositivos de entrada 2D, puesto que presentaba mayor facilidad de uso y ahorro de tiempo al efectuar las tareas de diseño. Otro proyecto similar es THRED desarrollado por Shaw y Green [32]: un sistema de diseño con dos tangibles con sensores de seis grados de libertad, que son utilizados en cada mano del usuario para dibujar de forma libre superficies poligonales tales como terrenos y otros objetos de un mundo virtual. Podemos citar más trabajos con similares características como: *VB2 System* [33], *3DM* [34], *WIM system* [35] y *Polyshop system* [36].

El tangible de realidad mixta *Novint Falcon* [24] es un dispositivo háptico de conexión USB que está diseñado para sustituir al ratón. Los usuarios son capaces de controlar el *Novint Falcon* aferrándose a una burbuja de agarre, que se mueve en tres dimensiones: (i) arriba y abajo, (ii) hacia adelante y hacia atrás y (iii) de derecha a izquierda. Mientras que el usuario mueve la burbuja de agarre, los sensores del tangible se comunican con el ordenador, aplicando el movimiento dentro de un programa de ordenador. Esta burbuja permite a los usuarios la manipulación de objetos en una aplicación virtual 3D, proporcionando retroalimentación táctil.

2.4. CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE

Como se ha visto en este capítulo, existen distintas experiencias del uso de tangibles como material de apoyo en la educación. Desde soluciones utilizando objetos que están presentes únicamente en mundo real, hasta aquellos que dan forma física a información digital.

De estos trabajos podemos obtener varias conclusiones. En primer lugar, la mayoría de las experiencias revisadas están enfocadas a la educación con niños debido a que el uso de tangibles muestra mayor efectividad en etapas tempranas de desarrollo cognitivo. Sin embargo, también hay evidencia de resultados favorables en educación secundaria: combinar mundos virtuales con interfaces tangibles resulta ser una aproximación positiva para el desarrollo de actividades colaborativas, para el fomento de la creatividad y para la comprensión de conceptos abstractos. En segundo lugar, la mayoría de proyectos educativos están basados únicamente en experiencias en realidades virtuales, son escasos los proyectos educativos que combinan mundos virtuales con tangibles.

Además, podemos concluir que para que la interacción con elementos virtuales sea lo más natural posible, es necesario que dichas interfaces cuenten con al menos 6 grados de libertad. El empleo de un dispositivo de estas características para el control de objetos 3D evita algunas de las dificultades que aparecen si se emplean dispositivos diseñados para controlar interfaces 2D, como son el ratón y las pantallas táctiles. Una de las principales limitaciones es el impedimento de la especificación directa y simultánea de posiciones y orientaciones, dificultad que tradicionalmente ha tratado de ser resuelta a través de la combinación de GUIs y teclas dedicadas a especificar el parámetro a modificar.

Los proyectos revisados emplean el uso de diversas tecnologías para captar la interacción del usuario sobre el dispositivo, que se pueden clasificar de acuerdo al tipo de contracción muscular percibida: dispositivos isométricos y dispositivos isotónicos. Un dispositivo isométrico interpreta la fuerza o torque ejercida por una extremidad humana, mientras que un dispositivo isotónico interpreta el movimiento. Estas soluciones presentan buenos resultados para el control de un objeto tridimensional, sin embargo son tecnologías de nicho debido a su costo, volumen y hasta cierto punto aparatosidad.

Finalmente, pocas experiencias de tangibles con mundos virtuales han sido implementadas en clases reales, la mayoría de estudios se han realizado con prototipos de laboratorio. Es importante analizar el resultado de estas tecnologías en entornos educativos reales.

3. PROPUESTA DE UN TANGIBLE DE REALIDAD MIXTA

Tomando en cuenta lo expuesto en el estado del arte, las realidades mixtas tienen potencial en el ámbito educativo, pero sin embargo no han sido aún ampliamente adoptadas debido a que se requiere contar con elementos tecnológicos adecuados para su integración en las actividades académicas.

El presente proyecto se enfoca en la elaboración de una experiencia educativa en mundos virtuales mediante el desarrollo de una interfaz de usuario tangible (TUI por sus siglas en inglés Tangible User Interface) que permita la interacción con objetos virtuales en seis grados de libertad (traslación en 3 ejes perpendiculares entre sí y rotación sobre los mismos). Al utilizar un dispositivo de estas características para el control de objetos 3D, se evitan algunas de las dificultades que aparecen si se emplean dispositivos diseñados para controlar interfaces 2D, como son el ratón y las pantallas táctiles. Una de las principales limitaciones es el impedimento de la especificación directa de posiciones y orientaciones, dificultad que tradicionalmente ha sido resuelta a través de la combinación de GUIs y teclas dedicadas para especificar el parámetro a modificar.

Adicionalmente, el tangible propuesto tiene en cuenta la forma en que los seres humanos transmiten información a un dispositivo a través de sus extremidades. Una extremidad puede enviar y recibir información a través de dos tipos de contracciones musculares, ya sea mediante la fuerza o el desplazamiento. Los dispositivos capaces de interpretar las señales de fuerza son llamados isométricos mientras que aquellos que interpretan el movimiento son llamados dispositivos isotónicos.

La combinación de interacciones isotónicas e isométricas para controlar la traslación y rotación de elementos de un mundo virtual, permitirá elaborar experiencias de pedagogía constructivista en las que el estudiante abstraerá conocimientos, debido a la percepción de participación directa con el mundo virtual. En el presente proyecto, la experiencia propuesta está orientada al aprendizaje de

conceptos abstractos, concretamente a la enseñanza de las secciones cónicas en geometría.

3.1 DISEÑO

3.1.1. Mundo virtual

La plataforma para albergar el mundo virtual será OpenSim debido a que, además de ser de código abierto y gratuito, permite crear ambientes virtuales y gestionar usuarios. Una ventaja de OpenSim respecto a otros mundos virtuales, es la de no estar sujeto a las políticas e intereses que existen en servidores propietarios. Second Life causó controversia al eliminar 4 simuladores de la universidad Woodbury. Uno de los argumentos de la compañía propietaria de Second Life (Linden Labs) fue que la existencia de una réplica del muro de Berlín dentro del campus virtual no estaba conforme con sus términos de servicio [37]. Adicionalmente, en Second Life existe contenido inapropiado para menores de edad, lo cual impide su uso como plataforma para educación primaria y secundaria.

Para la realización de la actividad educativa se creó una isla dedicada a la enseñanza de geometría, donde los estudiantes pueden interactuar con los diferentes objetos virtuales proporcionados. Debido a que la actividad se centra en la enseñanza de la generación de las diferentes secciones cónicas que se obtienen al intersectar un plano con un cono (Figura 1), es necesario crear estos objetos en el mundo virtual y definir su comportamiento.

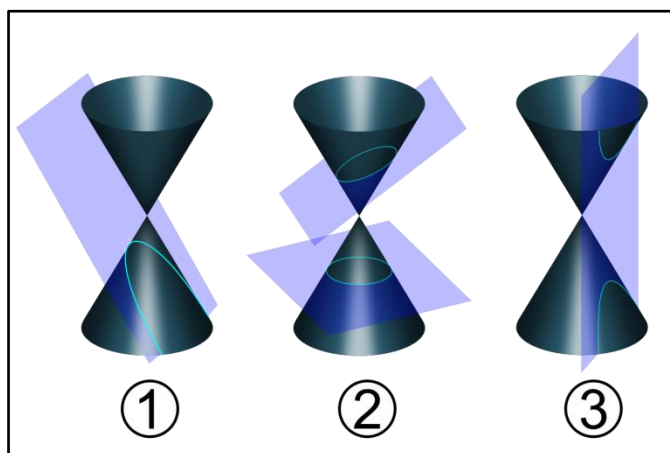


Figura 1: Secciones cónicas resultantes de la intersección de un plano con un cono: parábola (1), elipse y circunferencia (2) e hipérbola (3). Tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/Secci%C3%B3n_de_un_cono

El estudiante tendrá la posibilidad de modificar atributos del plano virtual como el ángulo de inclinación y desplazamiento. Dependiendo del ángulo de corte entre el plano y el cono el estudiante visualizará la sección cónica generada. Como información adicional una pizarra virtual detallará la sección cónica generada.

3.1.2. Interfaz tangible

Para que un usuario pueda interactuar de forma natural con objetos virtuales, es necesario emular la forma con la que un usuario interactúa con objetos físicos a través de sus extremidades. Con esta consideración, el dispositivo tangible deberá tener la capacidad de percibir dos tipos de interacciones musculares: isotónicas e isométricas.

Los dispositivos isométricos también se conocen como dispositivos de presión debido a que utilizan sensores que captan la fuerza producida por la contracción muscular a través de una resistencia sin un cambio significativo. Estos dispositivos ejercen una fuerza de igual magnitud en la dirección opuesta a la fuerza aplicada.

Los dispositivos isotónicos también se conocen como dispositivos de desplazamiento, debido a que los sensores captan el movimiento de la extremidad humana sin ejercer una resistencia. Estos dispositivos ofrecen libertad de movimiento, ya que no ejercen un lastre significativo en la extremidad.

La investigación realizada por Zhai *et al.* [29] sugiere el uso de sensores isotónicos cuando la velocidad e intuitividad son la prioridad y de sensores isométricos cuando el control y la calidad de la trayectoria son más importantes .

El prototipo de interfaz tangible deberá ser capaz de capturar ambos tipos de contracciones musculares a través de diversos sensores embebidos, como se muestra en la Figura 2. Mediante la combinación de los datos obtenidos de un giroscopio digital, un acelerómetro y un magnetómetro, las contracciones isotónicas son capturadas. Por otro lado, un sensor de presión analógico captura los datos para determinar la cantidad de fuerza aplicada sobre el dispositivo (contracción isométrica).

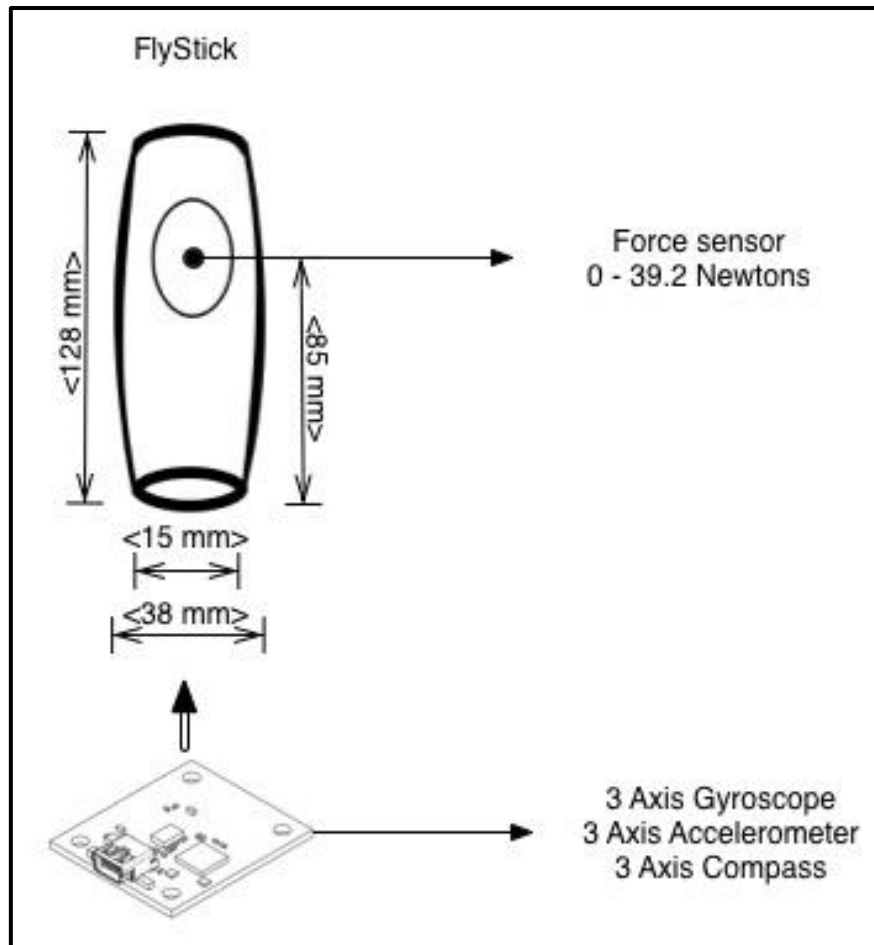


Figura 2: Diseño esquemático de FlyStick

Al ser un dispositivo de interfaz humana, ciertos aspectos ergonómicos deben ser considerados:

- Forma y tamaño: La actividad educativa que se detallará más adelante está dirigida a estudiantes entre 12 y 14 años, por ello se tuvieron en cuenta las dimensiones de otros dispositivos dirigidos a adolescentes. La forma y dimensiones del mango del galardonado *DualShock 4* fueron utilizadas como inspiración para albergar y ubicar a los sensores como se detalla en la (Figura 2).
- Material: El material para la construcción de los elementos que tendrán contacto directo con la piel deberá ser PLA, que al ser un plástico orgánico su manipulación no presenta toxicidad para el ser humano.

3.1.3. Middleware

El rol principal del middleware es el de fusionar mundo real con el virtual. Para ello debe ser capaz de procesar la información recuperada por los sensores incrustados en el tangible y transformar esta información en acciones dentro del mundo virtual. Este componente tendrá dos módulos:

Comunicación usuario-middleware: En este módulo los datos provenientes de los sensores de movimiento y fuerza son procesados, teniendo en cuenta la naturaleza de la interacción (isotónica e isométrica). Las interacciones isotónicas especificarán la dirección y módulo del desplazamiento traslacional y rotacional del objeto virtual, mientras que la fuerza percibida (movimiento isométrico) modificará al módulo del desplazamiento. La información resultante será enviada al componente del middleware encargado de la comunicación con el mundo virtual.

Comunicación middleware-mundo virtual: Se encargará de transmitir la información procesada proveniente del tangible hacia el mundo virtual. Los objetos virtuales deberán estar programados para modificar su comportamiento en función de los datos recibidos por el middleware.

3.2 IMPLEMENTACIÓN

La arquitectura utilizada para interconectar a los tangibles, middleware y mundo virtual para dar el efecto de fusión de realidades está basada en la arquitectura utilizada en *VirtualTouch* [38], como se muestra en la figura 3.

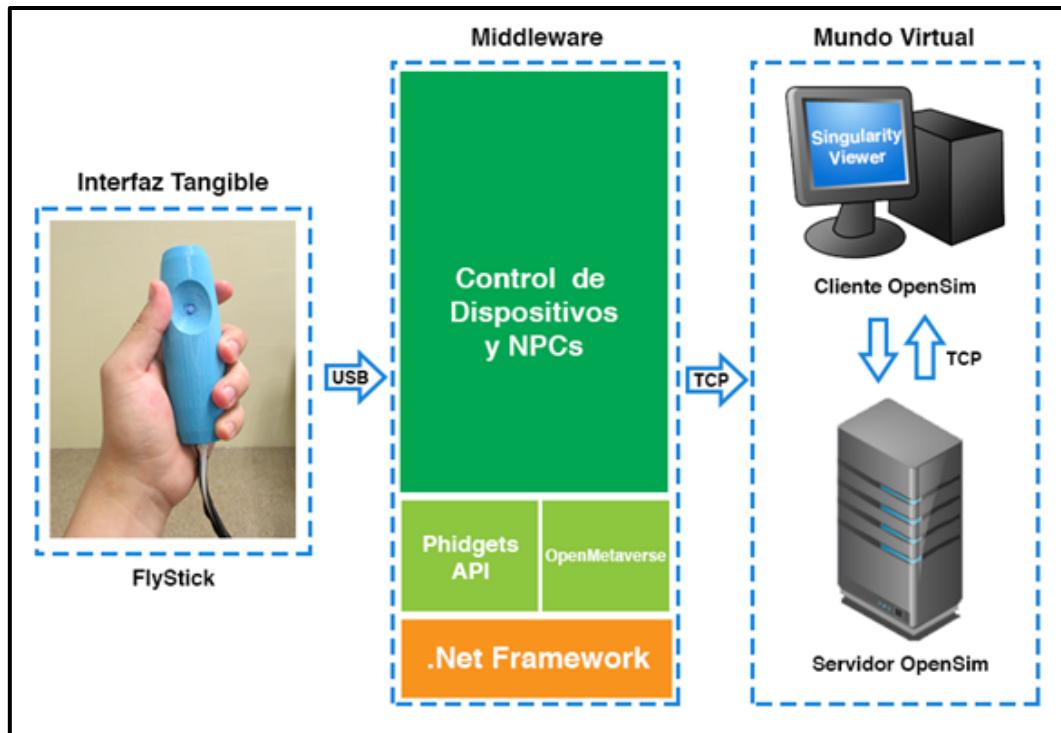


Figura 3: Arquitectura basada en VirtualTouch [38]

El middleware está desarrollado sobre la plataforma de .Net escrito en el lenguaje de programación C#. El middleware utiliza la API del fabricante de los sensores Phidgets para adquisición de datos percibidos por los sensores situados dentro del tangible. Estos datos son transmitidos por medio de un puerto USB al ordenador donde se ejecuta el middleware. En cuanto a la comunicación con el mundo virtual, una de las particularidades presentes en Second Life (y por consiguiente en OpenSim) es que cuando fuentes externas al mundo virtual requieren realizar interacciones con elementos que pertenecen al mundo virtual hay dos formas de llevar a cabo esta comunicación. La primera se realiza mediante el uso de llamadas HTTP invocadas por un script incrustado en un objeto del mundo virtual y la segunda mediante la instanciación de un avatar controlado por el ordenador también conocido como NPC. La primera forma de comunicación resulta conveniente cuando el tráfico de datos es moderado, la segunda forma es adecuada cuando la interacción con el mundo virtual demanda un alto tráfico. Es por esta razón que el middleware incorpora un conjunto de instrucciones para ubicar y controlar a un NPC en el mundo virtual utilizando de la librería de openmetaverse. Este artificio permite efectuar acciones directamente en el servidor OpenSim y consecuentemente cualquier cliente es capaz de percibir en tiempo real la interacción del middleware sobre el mundo virtual.

A continuación se describe la implementación de la arquitectura.

3.2.1 Interfaz tangible

Como se indicó en el capítulo de diseño, el dispositivo tangible debe ser capaz de percibir dos tipos de contracciones musculares: isotónicas e isométricas. La interacción isotónica tiene en cuenta el desplazamiento libre del dispositivo. Para captar este movimiento se incorporaron un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro, encapsulados en un sensor digital fabricado por la empresa Phidgets Inc. Las características de los sensores se detallan a continuación:

- **Acelerómetro:** Sensor de aceleración en tres ejes, puede captar aceleraciones con una precisión de $76.3\mu\text{g}$.
- **Giroscopio:** Capta el factor de cambio de la posición angular a movimientos con una precisión de $0.02^\circ/\text{s}$.
- **Magnetómetro:** Sensor magnético de tres ejes capaz de percibir cambios con una precisión de 3mG .

En cuanto a la captación de interacciones isométricas se incorporó un sensor de fuerza también fabricado por la empresa Phidgets Inc, que capta fuerza, de 0 hasta 39.2N con una incertidumbre del 4%.

La dimensión de los sensores y el grosor de los conectores y cables fueron considerados para la fabricación del cuerpo plástico del tangible. Este se modeló mediante la herramienta CAD 3ds-max (figura 4), y fue exportado e impreso en plástico orgánico (figura 5) mediante una impresora 3D de polímeros (Ultimaker 2).

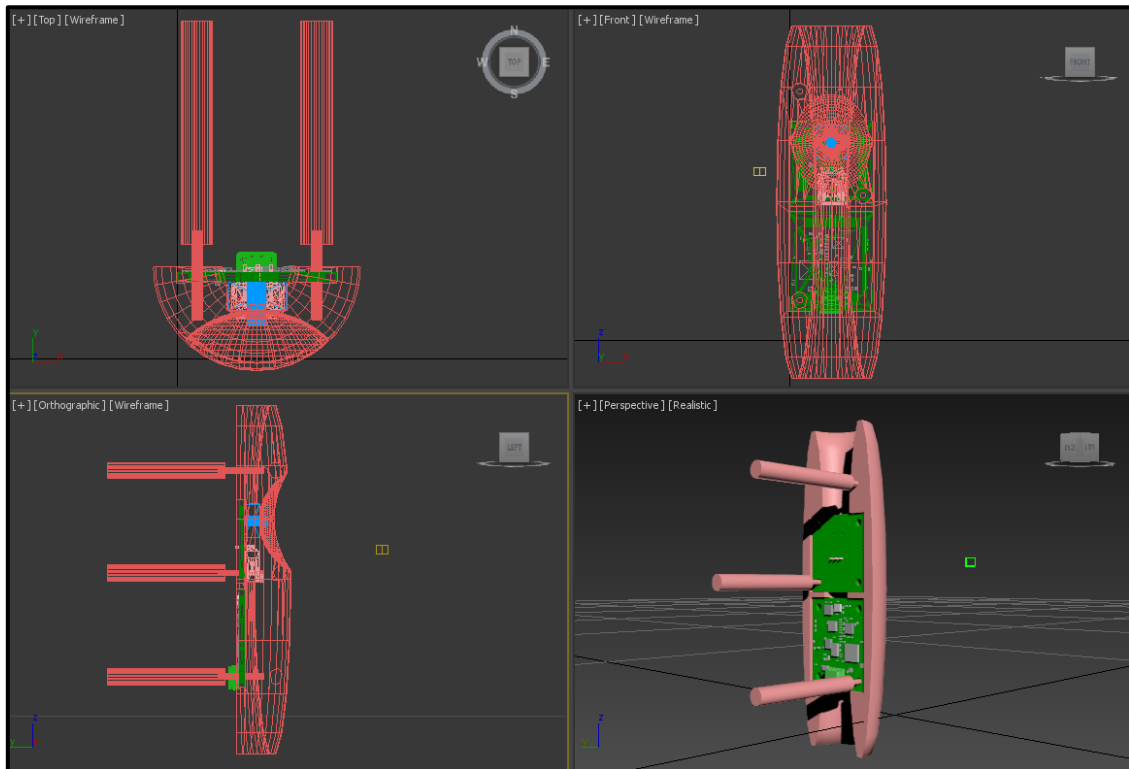


Figura 4: Diseño del tangible FlyStick.



Figura 5: FlyStick ensamblado.

3.2.2 Middleware

Se realizó una modificación a las librerías del middleware utilizado en *VirtualTouch* [38], puesto que tanto los métodos para recuperar la información de los sensores como los métodos para envío de mensajes al middleware eran insuficientes para el tipo de interacción propuesto. Adicionalmente se agregaron librerías para el control del FlyStick. A continuación se detallan las implementaciones realizadas en el middleware.

```
void calcularNavegacion()
{
    double[] gravedad = {
        spatial.accelerometerAxes[0].Acceleration,
        spatial.accelerometerAxes[1].Acceleration,
        spatial.accelerometerAxes[2].Acceleration};

    double[] campoMagnetico = {
        spatial.compassAxes[0].MagneticField,
        spatial.compassAxes[1].MagneticField,
        spatial.compassAxes[2].MagneticField};

    double alabeo = Math.Atan2(gravedad[1], gravedad[2]);

    double cabeceo = Math.Atan2(-gravedad[0] / (gravedad[1] * Math.Sin(alabeo) + gravedad[2] *
Math.Cos(alabeo)));

    double guinada = Math.Atan2(campoMagnetico[2] * Math.Sin(alabeo) - campoMagnetico[1] * Math.Cos(alabeo),
        campoMagnetico[0] * Math.Cos(cabeceo) + campoMagnetico[1] * Math.Sin(cabeceo) * Math.Sin(alabeo) +
        campoMagnetico[2] * Math.Sin(cabeceo) * Math.Cos(alabeo));

    double[] angulos = { alabeo, cabeceo, guinada };

    try
    {
        for (int i = 0; i < 3; i += 2)
        {
            if (Math.Abs(angulos[i] - _angulos[i]) > 3)
            {
                foreach (double[] aux in compassBearingFilter)
                {
                    if (angulos[i] > _angulos[i])
                        aux[i] += 360 * Math.PI / 180.0;
                    else
                        aux[i] -= 360 * Math.PI / 180.0;
                }

                _angulos = (double[])angulos.Clone();

                compassBearingFilter.Add((double[])angulos.Clone());
                if (compassBearingFilter.Count > compassBearingFilterSize)
                    compassBearingFilter.RemoveAt(0);

                guinada = cabeceo = alabeo = 0;
                foreach (double[] aux in compassBearingFilter)
                {
                    alabeo += aux[0];
                    cabeceo += aux[1];
                    guinada += aux[2];
                }
                guinada /= compassBearingFilter.Count;
                cabeceo /= compassBearingFilter.Count;
                alabeo /= compassBearingFilter.Count;

                navegacion[0] = guinada * (180.0 / Math.PI);
                navegacion[1] = cabeceo * (180.0 / Math.PI);
                navegacion[2] = alabeo * (180.0 / Math.PI);
            }
        }
    }
    catch { }
```

Figura 6: Función para cálculo de navegación basada en el algoritmo AN4248.

Comunicación usuario-middleware: Una de las mejoras a la clase *PhidgetSpatial* encargada de recibir los datos que provienen del acelerómetro, magnetómetro y giroscopio fue la implementación de una función que realiza el

cálculo de la orientación al combinar los datos del acelerómetro con los del magnetómetro basada en el algoritmo AN4248 [39] (figura 6). Esta función proporciona los ángulos de navegación del sensor (cabeceo, alabeo y giñada).

La clase *FlyStick* instancia un objeto de la clase *PhidgetSpatial* para obtener los datos capturados por el kit de sensores (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro) para calcular el desplazamiento y rotación del tangible (interacción isotónica).

Para determinar el desplazamiento del tangible es necesario obtener la aceleración ejercida por el usuario sobre el tangible. Uno de los inconvenientes presentes al realizar una lectura directa del vector aceleración del sensor, es que los datos captados por el acelerómetro incluyen la aceleración producto de la contribución de la fuerza de gravedad que ejerce la tierra. Para obtener únicamente la aceleración realizada por el usuario, fue necesario eliminar la gravedad por medio de un filtro de paso bajo. La aceleración resultante es utilizada para calcular el desplazamiento efectuado durante 4 ms (figura 7).

```
public void calcularAceleracionLinear()
{
    TimeSpan dT=DateTime.Now - tiempo;
    float t=spatial.DataRate/1000;
    float alpha = t / (t + dT.Milliseconds);

    gravedad[0] = alpha * spatial.accelerometerAxes[0].Acceleration + (1 - alpha) *
    spatial.accelerometerAxes[0].Acceleration;
    gravedad[1] = alpha * spatial.accelerometerAxes[1].Acceleration + (1 - alpha) *
    spatial.accelerometerAxes[1].Acceleration;
    gravedad[2] = alpha * spatial.accelerometerAxes[2].Acceleration + (1 - alpha) *
    spatial.accelerometerAxes[2].Acceleration;

    aceleracionLinear[0] = spatial.accelerometerAxes[0].Acceleration - gravedad[0];
    aceleracionLinear[1] = spatial.accelerometerAxes[1].Acceleration - gravedad[1];
    aceleracionLinear[2] = spatial.accelerometerAxes[2].Acceleration - gravedad[2];

    tiempo=DateTime.Now;
}
```

Figura 7: Función para cálculo de aceleración eliminando la gravedad.

Adicionalmente *FlyStick* instancia un objeto de clase *InterfaceKit* para obtener los datos capturados por el sensor de fuerza (interacción isométrica). El valor de la fuerza combinado con el valor del desplazamiento determina el factor de cambio de posición de un objeto virtual en cada eje.

Comunicación middleware-mundo virtual: Una vez calculado el factor de cambio de cada atributo (3 traslaciones y 3 rotaciones), este valor es comunicado al mundo virtual mediante la llamada del método de envío de mensajes a OpenSim por medio de un NPC, implementado en la clase *BotOpenSim*. La difusión de

mensajes en el mundo virtual es transmitida por un canal de comunicación específico para cada tipo de atributo que tiene que ser modificado.

3.3.3 Mundo Virtual

El mundo virtual implementado para esta experiencia está albergado en un servidor OpenSim. Se creó una isla exclusiva para el desarrollo de actividades de aprendizaje relacionadas con la geometría. El acceso a esta isla se realiza mediante el uso de visualizadores de mundos virtuales compatibles con OpenSim. Dentro de ella los estudiantes pueden interactuar con los diferentes objetos virtuales por medio del dispositivo tangible.

Como se indicó en el capítulo anterior, la actividad educativa se centra en la enseñanza de la generación de las secciones cónicas a partir de la intersección de un plano y un cono. La interacción del estudiante con el tangible *FlyStick* modifica los atributos de traslación y rotación de un plano (objeto virtual), siendo estos los que determinen la profundidad y ángulo del corte con un cono. Además de visualizar la sección cónica generada por la intersección entre objetos virtuales, una pizarra virtual mostrará información contextualizada referente al corte producido (Figura 8).

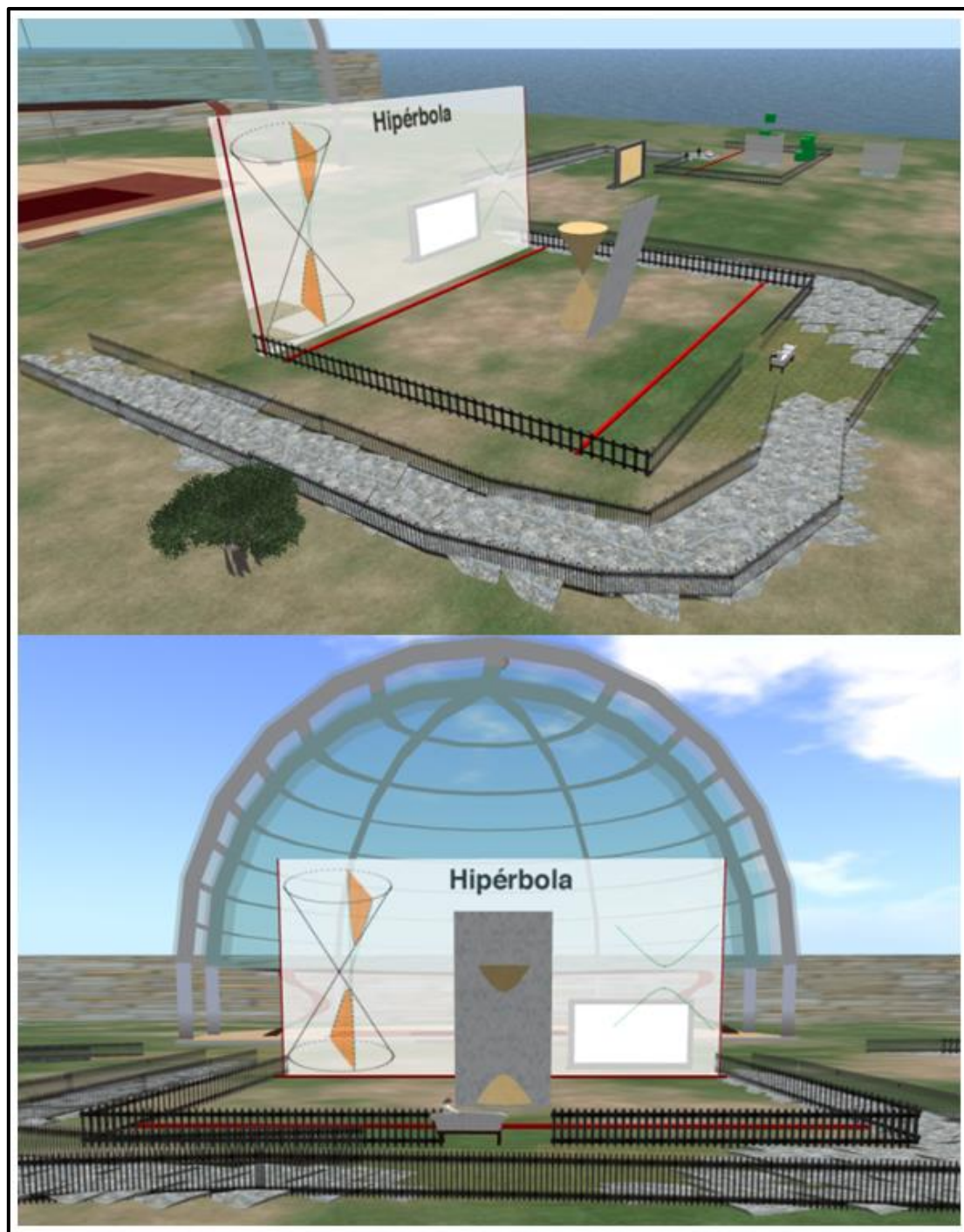


Figura 8: Elementos virtuales para la enseñanza de cónicas.

Para que un objeto virtual pueda interactuar por medio de un tangible, es necesario que dicho objeto cuente con un script que determine su comportamiento en función de los mensajes transmitidos por el middleware. Estos scripts son programados utilizando LSL, un lenguaje orientado a eventos propio de OpenSim y SecondLife.

A continuación se detalla el comportamiento de los objetos virtuales.

Plano virtual: Este objeto virtual esta implementado para modificar su traslación y rotación en función de 3 tipos de mensajes (Figura 9). Los mensajes recibidos por el canal -1 modifican su estado de activo a inactivo cuando el mensaje es igual a “sleep” y de activo a default cuando el mensaje es “set”. Estas transiciones tienen el objetivo de desactivar el plano para que deje de ser controlado por el tangible y el de reinicializar sus variables en función a su posición actual, especialmente útil cuando se requiere trasladar la actividad a una nueva ubicación.

Los mensajes recibidos por los canales -900 y -911 modifican respectivamente la posición y rotación del plano, dependiendo de la relación entre el ángulo de conicidad y la inclinación del plano respecto del eje del cono. El plano enviará un mensaje por el canal -700 indicando el tipo de sección cónica realizada, un ejemplo de esta implementación se puede ver en el anexo A.

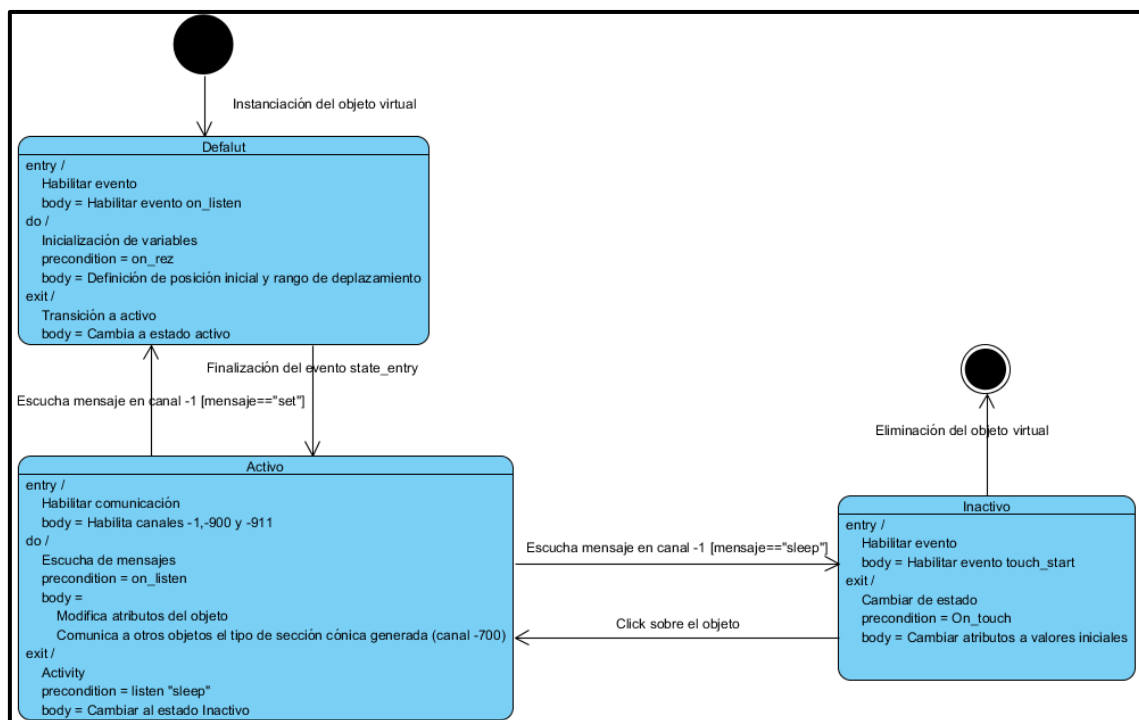


Figura 9: Diagrama de estados para el plano virtual.

Pizarra virtual: Es un objeto virtual que proporciona información al usuario por medio de imágenes predefinidas desplegadas sobre su superficie. Estas imágenes varían dependiendo del estado en el que se encuentre la pizarra. Los estados posibles son: default, circunferencia, elipse, hipérbola y parábola. Todos los estados pueden realizar una transición de estado a cualquier estado excepto reflexivamente

y al estado default (figura 10). La transición de estado sucede cuando el objeto recibe un mensaje por el canal -700 indicando al estado que debe ir.

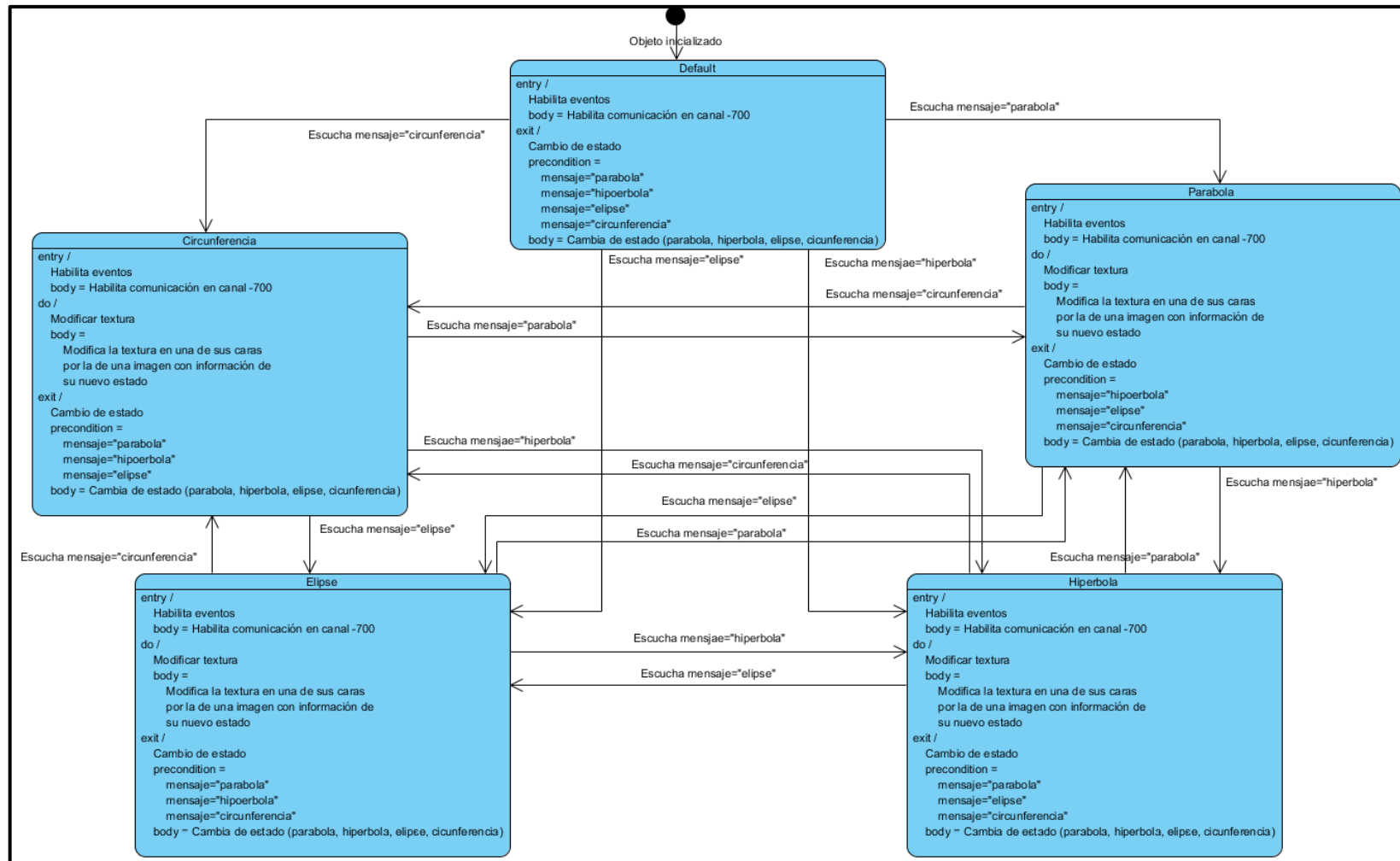


Figura 10: Diagrama de estados para la pizarra virtual.

4. EVALUACIÓN

Para evaluar la tecnología de realidad mixta desarrollada, se diseñaron dos actividades educativas. La primera actividad emplea la interfaz tangible *FlyStick* con el objetivo de enseñar geometría. La segunda actividad persigue el mismo objetivo, pero mediante una metodología tradicional. Para esta actividad participó un grupo de control formado por estudiantes con características demográficamente similares a las del grupo que empleó *FlyStick*. Los resultados de las dos actividades fueron contrastadas para evaluar la efectividad de la experiencia con *FlyStick*.

Gracias a la estrecha colaboración con la institución de educación secundaria “Florida Secundaria” ubicada en Valencia (España), fue posible contar con la participación de usuarios reales.

La experiencia educativa con realidad mixta a través de *FlyStick* fue llevada a cabo mediante 3 sesiones de 3 horas. La primera sesión se dedicó a la introducción a mundos virtuales. En la segunda sesión, los estudiantes participaron y fueron evaluados tras realizar una actividad educativa, y en una tercera actividad realizada dos semanas después se evaluaron de nuevo los conocimientos adquiridos.

4.1 DISEÑO

4.1.1. Actividad en realidad mixta

La actividad propuesta está basada en la metodología constructivista, por medio de realidad mixta utilizando *FlyStick*. Para ello se emplearon aspectos utilizados en la estructura de diseño de videojuegos [40]. Al igual que los videojuegos, la actividad está definida por un territorio con un sistema de reglas de juego encaminando al jugador a completar una serie de misiones u objetivos a alcanzar. A continuación se detallan los aspectos utilizados:

Objetivo: Mediante la interfaz de realidad mixta *FlyStick*, el alumno tiene que cortar un cono doble utilizando un plano. A través de la interacción con el tangible se puede modificar el ángulo y profundidad de corte. Las secciones cónicas

resultantes dependerán de la posición y orientación del plano respecto al cono doble.

Para proporcionar al estudiante una retroalimentación de las acciones realizadas en el mundo virtual, se muestra información en una pizarra virtual, con la finalidad de que el estudiante reflexione sobre el resultado obtenido.

Método pedagógico: Utilizar la metodología constructivista para la enseñanza de geometría, mediante la provisión de escenarios y materiales didácticos de realidad mixta. El estudiante será el principal protagonista de su aprendizaje, y construye el conocimiento por medio de las experiencias en el mundo virtual, reflexionando y obteniendo conclusiones.

Espacio y territorio: Se creó una isla virtual donde el estudiante puede explorar con libertad: la frontera está definida por el océano que la rodea. Esta isla cuenta con 3 elementos de interacción para realizar la actividad referente a secciones cónicas, que son un plano, un cono doble y una pizarra.

Reglas e instrucciones: Con la finalidad de atraer la atención de los estudiantes, la isla virtual es un entorno donde se ofrece libertad al usuario, por ello las reglas de interacción no están definidas; en lugar de ello se provee una pizarra virtual donde se muestra información adicional de las acciones realizadas sobre los objetos virtuales. Se plantea al estudiante modificar el ángulo de inclinación del plano utilizando *FlyStick* para obtener un determinado tipo de sección cónica. La experiencia termina cuando el estudiante considera que ha comprendido los conceptos presentados.

Participantes: Al estar la actividad enfocada a la enseñanza de geometría y específicamente al aprendizaje de las secciones cónicas, es necesario contar con la participación de estudiantes con un nivel de edad adecuado para la comprensión abstracta que se requiere, y que no tengan conocimientos previos acerca del tema. Adicionalmente es importante que los estudiantes cuenten con un conocimiento básico respecto al uso de OpenSim.

Sesiones: La evaluación de la actividad está estructurada en 3 sesiones:

- Sesión introductoria: Tiene la finalidad de que los participantes adquieran un conocimiento básico del uso de OpenSim. Al finalizar la sesión los participantes rellenarán un cuestionario para evaluar su experiencia. Los aspectos medidos en el cuestionario son la facilidad de uso, la utilidad para

aprender matemáticas, la motivación y la experiencia previa con mundos virtuales (anexo B).

- Sesión de aprendizaje en realidad mixta: Sesión destinada a realizar la actividad educativa mediante *FlyStick*. Al finalizar la actividad los estudiantes rellenarán dos cuestionarios tipo test: un cuestionario para evaluar la usabilidad de *FlyStick* y un cuestionario para evaluar los conocimientos adquiridos. Los aspectos medidos en el test de usabilidad son la facilidad de aprendizaje, la facilidad de uso, la utilidad y la satisfacción de *FlyStick* (anexo C). En cuanto al test de conocimiento, el aprendizaje es medido mediante 12 preguntas referentes a secciones cónicas (anexo D). Adicionalmente se tomará en cuenta la observación de campo realizada por cuatro personas que llevan el control de la actividad, que incluye a los profesores de informática y matemáticas.
- Sesión de post-evaluación: Esta sesión se llevará a cabo dos semanas después de la sesión de aprendizaje. El objetivo de esta sesión es la de verificar si los conocimientos evaluados en la sesión de aprendizaje lograron ser retenidos por el estudiante. Para ello los participantes realizarán de nuevo el test de conocimientos realizado en la sesión de aprendizaje (anexo D).

4.1.2. Actividad con método tradicional

La actividad está diseñada con la metodología tradicional que define al aprendizaje como la comunicación entre un emisor (maestro) y un receptor (alumno). Los conocimientos transmitidos serán evaluados y contrastados con los resultados obtenidos de la experiencia con *FlyStick*. A continuación se definen los aspectos considerados:

Objetivo: Realizar una experiencia educativa de forma tradicional para obtener datos de contraste para la experiencia de realidad mixta. Para ello se proporcionará información acerca de la definición, forma y origen de las secciones cónicas por medio de una presentación realizada por una profesora de matemáticas en un aula de clase. Se proporcionará material de apoyo escrito a cada uno de los estudiantes, donde se describen las diferentes secciones cónicas resultantes de la intersección de un plano con un cono doble.

Método pedagógico: Considerar al profesorado como guía y mediador en el proceso de aprendizaje. El conocimiento que adquiere el alumno se deriva del saber y de la experiencia práctica del maestro, quien ajusta la ayuda pedagógica a cada alumno/a adaptándose así a la diversidad. De esta manera, los estudiantes podrán interactuar con el profesor y con otros estudiantes para revisar los conceptos y el material de apoyo.

Participantes: Al estar la actividad enfocada a la enseñanza de geometría, y específicamente al aprendizaje de las secciones cónicas, es necesario contar con la participación de estudiantes con un nivel de edad adecuado para la comprensión abstracta que se requiere, y que los participantes no tengan conocimientos previos acerca del tema.

Sesiones: La evaluación de la actividad está estructurada en 2 sesiones:

- Sesión aprendizaje de manera tradicional: Los participantes realizarán la actividad en clase de forma tradicional. Al finalizar la actividad los estudiantes rellenarán un cuestionario tipo test que medirá el conocimiento obtenido mediante 12 preguntas referentes a secciones cónicas (anexo D). Este es el mismo test que realizó el grupo que usó *FlyStick*.
- Sesión de post-evaluación: Esta sesión se llevará a cabo dos semanas después de la sesión de aprendizaje. El objetivo de esta sesión es la de verificar si los conocimientos evaluados en la sesión de aprendizaje lograron ser retenidos por el estudiante. Para ello los participantes realizarán de nuevo el test de conocimientos realizado en la sesión de aprendizaje (anexo D).

4.1.3. Selección de participantes

Para la selección de usuarios, se contó con la colaboración de una profesora de matemáticas quien, tomando en cuenta el perfil del estudiante requerido, consideró y facilitó la participación de 60 alumnos que están cursando segundo y tercer nivel de ESO (13-14 años de edad). Este grupo de usuarios fue dividido aleatoriamente en dos grupos de 30 alumnos. Cada grupo tuvo una experiencia educativa diferente para el aprendizaje de las secciones cónicas. Para el grupo A se impartió la materia

utilizando realidad mixta y para el grupo B (grupo de control) mediante metodologías tradicionales (pizarra y tiza).

4.1.4. Preparación del laboratorio

Debido a que la experiencia involucra el uso de realidad mixta por un grupo de estudiantes en una institución educativa, se requirió preparar un laboratorio para proveer a todos los participantes de un ordenador con acceso al mundo virtual. Gracias a la colaboración del personal de la institución, fue posible preparar un laboratorio con 16 ordenadores donde se instaló un cliente compatible con OpenSim (Singularity Viewer) así como también el middleware de *FlyStick*.

Uno de los inconvenientes que surge al intentar usar OpenSim en instituciones educativas, se presenta a la hora de establecer la comunicación entre el cliente con el servidor debido a que, por motivos de seguridad, el puerto por el cual el cliente realiza el enlace suele estar dentro del rango de puertos bloqueados por la institución. Por tal motivo, se requirió gestionar la autorización para que se habilitara temporalmente el puerto.

4.2 SESIONES

4.2.1. Sesión introductoria

Se desarrolló una sesión introductoria en el laboratorio, con la participación de los 30 estudiantes del grupo de aprendizaje mediante realidad mixta. Para la sesión se contó con la colaboración de un profesor de informática del instituto, quien apoyó en la toma de información y a resolver las preguntas de los estudiantes.

Durante la sesión los estudiantes se familiarizaron con la interfaz e interacción básica con en el mundo virtual (OpenSim) en tareas tales como: trasladarse de un sitio a otro, comunicarse con otros avatares, crear y manipular elementos virtuales y personalizar la apariencia de su avatar. Al finalizar esta sesión, los participantes rellenaron un cuestionario acerca de su experiencia (anexo B).



Figura 11: Estudiantes interactuando con mundos virtuales en una sesión introductoria.

4.2.2. Sesión de aprendizaje en realidad mixta

Al igual que la sesión de introducción, el lugar donde se llevó a cabo fue en el laboratorio de informática, habilitado a tal fin, contando con la colaboración de los profesores de informática y matemáticas, y con la participación de 30 estudiantes del “grupo A”. Con la finalidad de poder controlar la realización de la actividad educativa y al disponer de un solo dispositivo tangible, la sesión se realizó con 10 participantes cada vez.

Al iniciar la sesión existieron dos inconvenientes. El primero se presentó al momento de iniciar el middleware indicando un mensaje de error al parsear un valor, este problema se solucionó rápidamente al modificar un parámetro de la configuración regional. El segundo inconveniente se manifestó durante los primeros 15 minutos de la sesión donde la interacción con el mundo virtual por medio de *FlyStick* se vio ralentizada debido a la calidad de red. Tras superar estos inconvenientes, la sesión se realizó de acuerdo a lo esperado.

Los participantes realizaron la actividad educativa diseñada para la enseñanza de secciones cónicas, aprovechando las ventajas que tiene la interacción de un mundo virtual 3D por medio de *FlyStick* (ver Figura 12). Mientras tanto 4 personas realizaban la observación y control de la actividad.

Los estudiantes mostraron gran interés en realizar la actividad y realizaron preguntas acerca de la materia, el mundo virtual utilizado y la construcción del tangible. Rápidamente ganaron dominio en la interacción con *FlyStick*, incluso aquellos participantes que a primera vista asociaron el tangible con el mando de la consola de videojuegos Nintendo Wii y mostraron confusión al ver que el tangible no tenía el mismo comportamiento. Por otra parte aquellos participantes que tenían experiencia interactuando con videojuegos, fueron los que demostraron una mayor destreza.

Al finalizar la experiencia cada estudiante realizó un cuestionario de usabilidad del tangible y un cuestionario para evaluar los conceptos aprendidos (ver anexos C y D).



Figura 12: Estudiante realizando una sección cónica en realidad mixta por medio de *FlyStick*.

4.2.3. Sesión de aprendizaje con método tradicional

Esta sesión fue realizada durante una hora, en un aula de clase, con la participación del “grupo B” (grupo de control)(ver figura 13). La sesión fue dirigida por la profesora de matemáticas, quien impartió los conocimientos referentes a las secciones cónicas mediante el empleo de material didáctico escrito y a través del uso de explicaciones en una pizarra. Al finalizar la clase cada estudiante realizó un cuestionario idéntico al utilizado con el “grupo A” para evaluar los conceptos aprendidos (ver figura 14). El formato del cuestionario se encuentra en el anexo D.



Figura 13: Estudiantes estudiando las secciones cónicas de forma tradicional.

4.2.4. Sesión de post-evaluación

Esta sesión se realizó dos semanas después de la sesión de aprendizaje de los grupos A y B. Se evaluaron nuevamente los conocimientos adquiridos, mediante un cuestionario idéntico al empleado en la sesión de aprendizaje. Adicionalmente se realizó una entrevista semiestructurada con la profesora de matemáticas para conocer su opinión respecto a la experiencia desde el punto de vista docente (ver anexo E).



Figura 14: Estudiante realizando el cuestionario de evaluación de secciones cónicas.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la finalidad de evaluar la experiencia la enseñanza de geometría a través de realidades mixtas por medio de *FlyStick*, se realizaron encuestas y cuestionarios al finalizar cada sesión. A continuación se detallan los resultados obtenidos:

Sesión introductoria: El cuestionario rellenado por los participantes del “grupo A”, después de finalizar la experiencia introductoria en mundos virtuales, está orientado a obtener la percepción del estudiante respecto a los mundos virtuales en las siguientes dimensiones: conocimiento previo, facilidad de interacción, utilidad didáctica y motivación (Tabla 1).

Dimensión	Pregunta	Si	No
Conocimiento previo	¿Conocías los mundos virtuales?	65%	35%
	¿Has jugado en mundos virtuales?	58%	42%
Facilidad de uso	¿Te ha parecido fácil usar e interactuar en los mundos virtuales?	96%	4%
	¿Ves difícil cambiar las propiedades de un objeto virtual?	39%	62%
	¿Has encontrado dificultad en realizar tareas colaborativas en el mundo virtual?	15%	85%
Utilidad para aprender matemáticas y geometría	¿Crees que los mundos virtuales facilitan el entendimiento de los ejes de coordenadas X, Y, Z?	73%	27%
	¿Crees que los mundos virtuales te facilitarán la enseñanza de Matemáticas?	85%	15%
Motivación	¿Te ha gustado la sesión sobre mundos virtuales?	96%	4%
	¿Te gustaría realizar actividades usando los mundos virtuales en clase?	96%	4%
	¿Te gustaría realizar actividades usando los mundos virtuales desde casa?	69%	31%

Tabla 1: Resultado de la encuesta sobre mundos virtuales.

Los resultados del cuestionario de introducción mostraron que la mayoría de estudiantes conocían los mundos virtuales previamente, o por lo menos habían jugado en alguno. Como se puede ver en la tabla 1, la motivación tras la experiencia es muy positiva para la mayoría de participantes. Los mundos virtuales captaron el interés de los estudiantes. En cuanto a la facilidad de uso, los estudiantes lo consideraron simple para interactuar, por lo tanto la curva de aprendizaje requerida es suave.

Considerar el punto de vista del estudiante respecto a una tecnología es importante debido a que determinará el nivel de aceptación de la misma. Finalmente se puede ver que los estudiantes están dispuestos a participar en mundos virtuales con fines educativos.

Sesión de aprendizaje en realidad mixta: Al finalizar la experiencia de aprendizaje de geometría mediante realidad mixta utilizando *FlyStick*, los participantes (grupo A) rellenaron 2 cuestionarios.

El primer cuestionario obtuvo información acerca de la usabilidad de la realidad mixta propuesta (figura 15). Los resultados del cuestionario mostraron que la mayoría de estudiantes consideró la interfaz tangible como fácil de usar, de fácil aprendizaje y de gran utilidad a la hora de resolver la actividad. Adicionalmente la mayoría de participantes consideró que fue una experiencia agradable y satisfactoria.

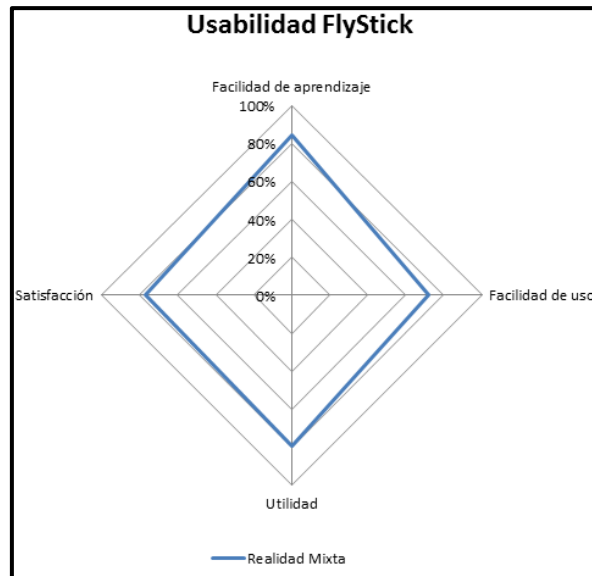


Figura 15: Resultado del test de usabilidad de realidad mixta.

El segundo cuestionario realizado a los participantes tras finalizar la actividad, tuvo por objetivo evaluar los conocimientos adquiridos. El cuestionario se realizó mediante 12 preguntas de opción múltiple referentes a la definición y forma de diferentes secciones cónicas. La evaluación de conocimientos mostró resultados favorables, con un promedio de 75% de aciertos de los participantes del grupo A (ver figura 16).

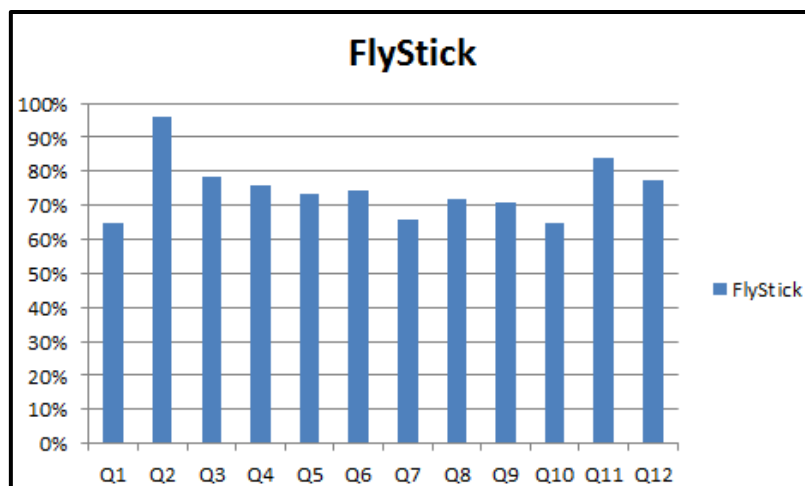


Figura 16: Evaluación de conocimientos adquiridos con realidad mixta.

Al comparar los resultados obtenidos entre los alumnos de 2º y 3º cursos de la ESO (figura 17). Se vio una diferencia entre los resultados de los alumnos de 2º curso de la ESO, que obtuvieron un promedio de 70% de aciertos, con los alumnos de 3º curso de la ESO, quienes obtuvieron un promedio de 79% de aciertos.

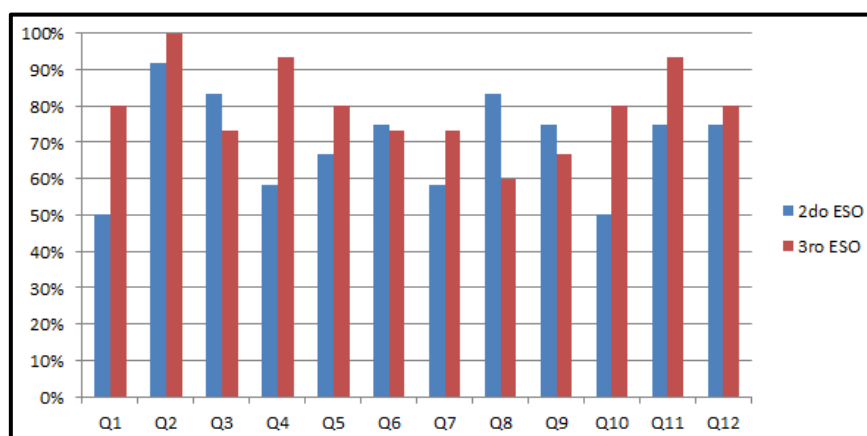


Figura 17: Evaluación de conocimientos adquiridos con realidad mixta por nivel.

Al parecer los estudiantes del 2º curso de la ESO no tienen la misma visión espacial que los alumnos del 3º curso de la ESO.

Sesión de aprendizaje con método tradicional: Al finalizar la sesión de aprendizaje de geometría mediante la metodología tradicional con el grupo de control (grupo B), los estudiantes rellenaron un cuestionario para evaluar los conocimientos adquiridos. Este cuestionario contenía la misma estructura,

valoración y preguntas que el realizado por el grupo A, los resultados fueron tabulados por preguntas (figura 18).

Los aciertos del grupo de control (grupo B) en promedio fueron del 86%, indicando que los estudiantes adquirieron un conocimiento satisfactorio tras la enseñanza con el método tradicional.

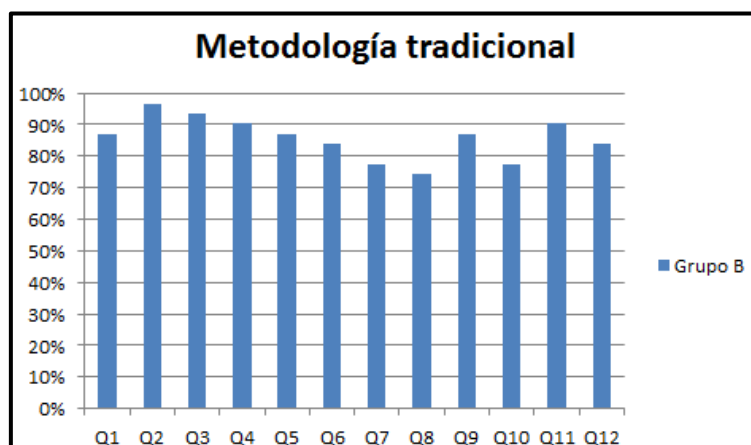


Figura 18: Evaluación de conocimientos adquiridos con metodología tradicional.

Al comparar los resultados del grupo que utilizó realidad mixta (grupo A) con los resultados obtenidos por el grupo de control (grupo B), se ve que los estudiantes del grupo de control obtuvieron un promedio superior en un 11% más de aciertos entre todas las preguntas (figura 19). Este resultado se comentará mas adelante.

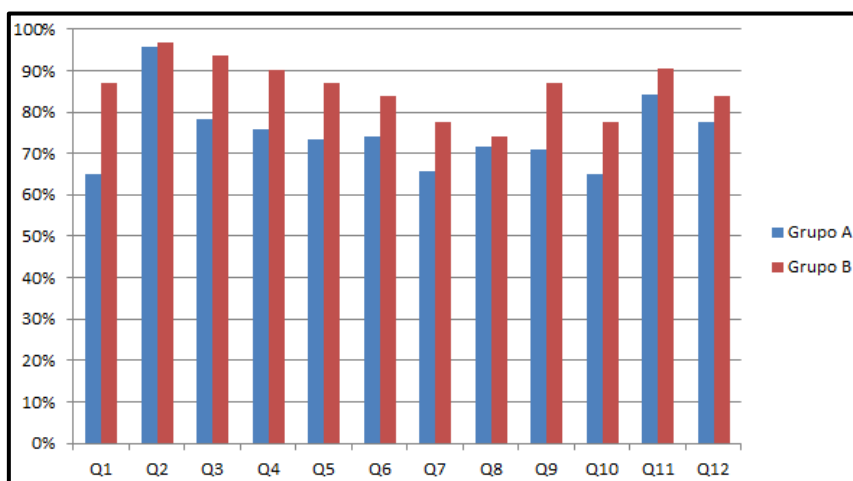


Figura 19: Evaluación de conocimientos con realidad mixta (grupo A) vs método tradicional (grupo B).

Sesión de post-evaluación: Como se indicó anteriormente, esta sesión se realizó dos semanas después de la primera evaluación. El objetivo era verificar si los

conocimientos adquiridos lograron trascender en el tiempo (figura 20). Tras realizar una evaluación comparativa entre el grupo A y el grupo B, se obtuvo una diferencia del 19% en el promedio a favor de los estudiantes que emplearon *FlyStick*.

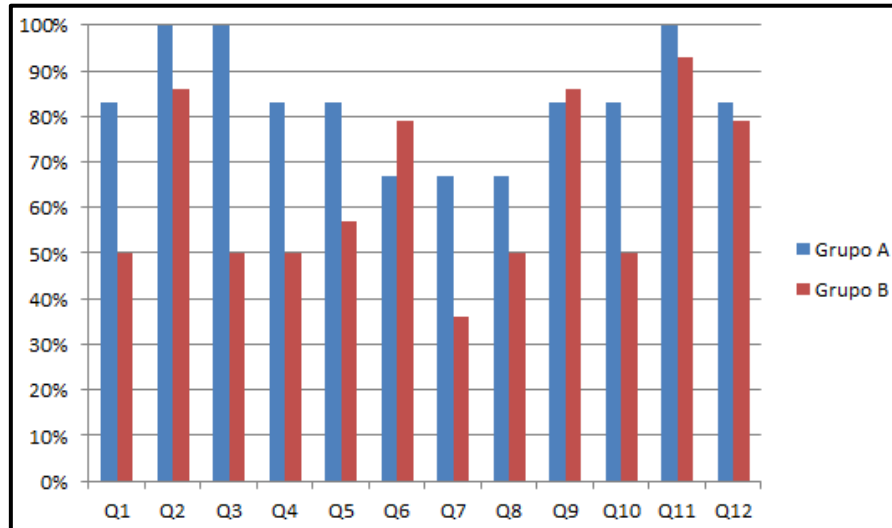


Figura 20: Post-evaluación entre realidad mixta (Grupo A) vs método tradicional (grupo B).

Este resultado sugiere que los estudiantes que tuvieron la experiencia en realidad mixta lograron retener mejor los conocimientos adquiridos, probablemente porque la experiencia con realidades mixtas fue más significativa.

La diferencia entre los resultados de la primera evaluación (86% de aciertos) respecto a la segunda (64% de aciertos) para el grupo B, mostró un decremento considerable del 22% (figura 21), indicando que los estudiantes de la metodología tradicional, a pesar de haber realizado mejor los test que se aplicaron nada más acabar la clase, no retuvieron los conocimientos a largo plazo.

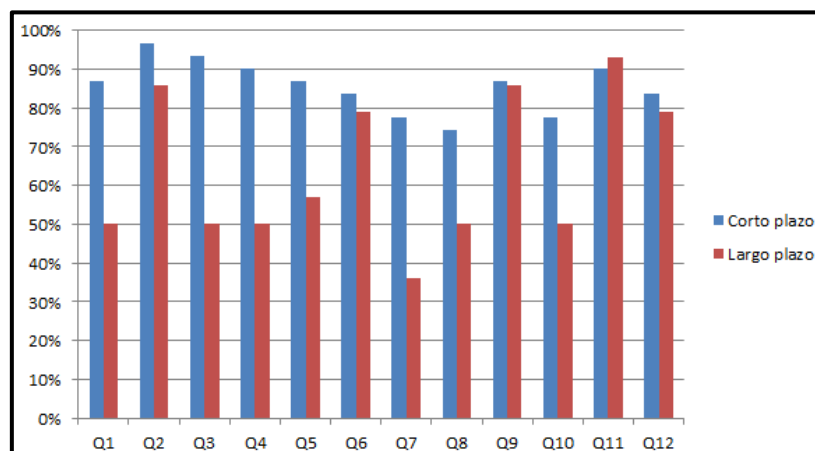


Figura 21: Comparación de resultados del grupo de control en el tiempo.

Adicionalmente se realizó una encuesta semiestructurada a la profesora de matemáticas. Las opiniones de la profesora se encuentran resumidas en la siguiente tabla:

Pregunta	Respuesta
¿Has utilizado mundos virtuales antes?	No.
¿Has encontrado interesante a la experiencia con <i>FlyStick</i> ?	Sí.
¿Has requerido soporte técnico para el uso de realidad mixta?	Sí.
¿Crees que los mundos virtuales pueden ayudar a la enseñanza de matemáticas?	Sí. <ul style="list-style-type: none"> • Los mundos virtuales pueden ayudar a visualizar escenarios sobre los cuales se puede aplicar procesos matemáticos. • Los mundos virtuales pueden ayudar al desarrollo de visión especial. • Los mundos virtuales son un entorno que ofrecen creatividad y motivación. • En un mundo virtual los estudiantes pueden compartir y colaborar en tareas específicas en tiempo real, sin preocuparse por el lugar físico en que el usuario se encuentra.
¿Has encontrado difícil de usar al tangible?	No.
¿Has encontrado difícil crear actividades didácticas en el entorno virtual?	Sí.
¿Cuáles crees que son las mayores ventajas de <i>FlyStick</i> ?	La interfaz tangible permitió recrear los movimientos, que no requieren de una mayor precisión en el mundo virtual, de una
¿Cuáles crees que son las mayores desventajas de <i>FlyStick</i> ?	<ul style="list-style-type: none"> • Los profesores necesitan algo de entrenamiento acerca de la realidad mixta. • Sería conveniente contar con un banco de recursos. • La necesidad de contar con una infraestructura compleja (servidores, puertos, clientes...) • La dificultad para diseñar actividades académicas que se ajusten a la malla curricular.
¿Crees que el estudiante pudo haberse distraído de la actividad?	Sí.
Valore la experiencia	<ul style="list-style-type: none"> • Los estudiantes mostraron una gran deseo por realizar las actividades. • En algunas actividades los estudiantes con necesidades educacionales especiales tuvieron el mismo rendimiento que los otros estudiantes. • Debería existir un mecanismo para realizar un seguimiento de la actividad de cada avatar y poder controlar su comportamiento.
Valore a <i>FlyStick</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ventajas: Ergonómico, ligero, fácil de instalar y utilizar. • Desventajas: Mejorar el botón integrado para cortar el plano (el botón es muy duro)

Tabla 2: Resumen de entrevista semiestructurada con la profesora de matemáticas.

En general la experiencia con *FlyStick* desde el punto de vista de la profesora fue muy positiva, sin embargo destacó que es necesario contar con herramientas tecnológicas que permitan a los educadores generar contenido didáctico para que *FlyStick* pueda ser aprovechado.

4.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados de la evaluación inicial mostraron un alto grado de aceptación de los mundos virtuales por parte de los estudiantes, estos resultados fueron corroborados al observar el grado de motivación de los participantes por resolver la actividad. Sin embargo es posible que el factor de novedad esté teniendo un impacto en la motivación, por lo que sería necesaria una evaluación a largo plazo de la realidad mixta.

La experiencia con *FlyStick*, mostró buenos resultados como metodología para la enseñanza de geometría. Al observar la primera evaluación de conocimientos, los estudiantes reflejaron un buen dominio de los conocimientos referentes al tema. No obstante, la metodología tradicional muestra ser más efectiva cuando el estudiante es evaluado a corto plazo, como se observó en los resultados de la evaluación de conocimientos realizados inmediatamente después de realizar la actividad.

Sin embargo *FlyStick* logró crear una experiencia significativa en el estudiante: los resultados de la post-evaluación reflejaron que los estudiantes retuvieron los conocimientos adquiridos. En este aspecto, la metodología tradicional no es efectiva a largo plazo, los estudiantes mostraron un decremento considerable en su rendimiento y en algunos casos con resultados poco satisfactorios.

A través de las encuestas se observó que la educación por medio realidad mixta causó gran interés tanto para a los estudiantes como a los docentes. Se destaca la facilidad de uso, el aumento de motivación, la efectividad para transmitir conocimientos abstractos y el impacto de la experiencia. A pesar del gran compromiso mostrado por los estudiantes durante la realización de las actividades, una dificultad presente es la necesidad de contar con un mecanismo de control que permita realizar un seguimiento de la actividad en progreso para cada estudiante.

Hay que considerar que la sesión de aprendizaje y evaluación para ambos grupos, fue realizada en la semana previa a las evaluaciones de fin de curso del instituto. Este factor pudo causar una situación de estrés en los estudiantes similar a la que tendrían en una evaluación con nota a un expediente, y pudo influenciar a ciertos estudiantes del grupo B a memorizar los conceptos con el objetivo de rendir un examen más no para realmente comprender el concepto.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 CONCLUSIONES

De acuerdo a la revisión realizada del estado del arte, la metodología constructivista logra crear conocimientos en el estudiante a partir de sus experiencias. El presente trabajo ha obtenido resultados empíricos que corroboran la efectividad de esta metodología, extendiendo el rango de aplicación de la misma y sugiriendo que las experiencias en realidades mixtas también pueden ser significativas para el estudiante, logrando crear conocimiento a largo plazo.

Según la observación del docente, uno de los factores que aumentó el nivel de significación de la experiencia fue la naturalidad con la que los estudiantes interactuaron con los objetos virtuales a través de *FlyStick*. Esto avala que la combinación de interacciones isotónicas e isométricas es una aproximación adecuada para la interacción con elementos virtuales por medio de un tangible. La decisión de captar esta interacción por medio de sensores Phidget mostró ser acertada, debido a que el tamaño de los sensores y su precisión permitieron crear un dispositivo ergonómico.

Adicionalmente los docentes resaltaron que los estudiantes, al utilizar la realidad mixta propuesta, realizaron las actividades de forma relajada y con un alto nivel de reflexión. Mostraron un nivel de concentración adecuado por más de una hora y media, algo que es difícil de obtener mediante métodos tradicionales.

A pesar de que *FlyStick* proporcionó una experiencia fluida a los usuarios a la hora de interactuar con objetos virtuales, en ocasiones se presentaron instantes de ralentización de movimiento causados por la calidad de la conexión a la red. Al ser *FlyStick* una interfaz que logra extender la presencia de los objetos virtuales al mundo real, la pérdida de control momentánea causó una ligera confusión en los participantes. Los estudiantes que estaban familiarizados con juegos en mundos virtuales, mostraron una recuperación más rápida debido a que este es un problema presente siempre que se depende de una red externa de comunicaciones de fiabilidad media.

El reto de utilizar realidad mixta en la educación está en crear herramientas que permitan al docente crear actividades académicas y controlar el progreso de las mismas. Para ello es necesario que exista una estrecha relación entre docentes y desarrolladores.

5.2 TRABAJO FUTURO

Como se mencionó en la sección de discusión de resultados, es necesario evaluar a largo plazo la realidad mixta propuesta debido a que los resultados obtenidos pudieron ser influenciados por el factor de novedad. Adicionalmente, es necesario proporcionar a los educadores una herramienta que les permita realizar un seguimiento y control de la actividad.

En lo referente al hardware utilizado en *FlyStick*, hay que considerar la sustitución del sensor de fuerza y las piezas de plástico que tienen contacto con el usuario por un material elástico que realice las funciones de encapsular los componentes electrónicos y detectar la interacción isotónica. De esta manera, sin importar el sitio donde el usuario emplee una fuerza, esta podrá ser detectada.

Respecto a la latencia presente en la interacción entre el tangible y el mundo virtual, es necesario investigar una forma de renderizar al objeto virtual en función de variables locales, de forma similar a la manera con la cual un avatar cambia de posición en el mundo virtual.

Adicionalmente, la utilización de hardware de visualización 2D (como monitores y proyectores) para la interacción con objetos 3D puede afectar en algunos casos a la percepción de la manipulación de objetos tridimensionales. La tecnología actual para resolver este problema utiliza dispositivos como visores estereoscópicos y pantallas 3D. Sin embargo esta tecnología todavía no alcanza la madurez y costos adecuados para ser implementados en las instituciones educativas. En este aspecto un trabajo futuro es investigar tecnologías de bajo costo que permitan realizar una simulación de efecto tridimensional para cualquier pantalla 2D. Los resultados de este trabajo han sido enviados en forma de artículo a la 9th International conference on Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence (UCAMI 2015), estando pendiente de aceptación.

Bibliografía

- [1] L. S. Vygotsky, *Mind in society: The development of higher psychological processes*, Cambridge, MA: Harvard university press., 1980.
- [2] Milgram P , Kishino F. , «A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays,» *IEICE Trans. Information Systems*, Vols. %1 de %2vol. E77-D, n° 12, pp. 1321-1329, 1994.
- [3] J. H. Pestalozzi, «ABC der Anschauung, oder Anschauungs-Lehre der Massverhältnisse,» *Geßner*, vol. 2, n° 1-2, 1803.
- [4] F. Froebel, *Pedagogics of the kindergarten*, Primera ed., Pedagogics of the kindergarten: D.Appleton and Company, 1909.
- [5] Piaget, J. , «La teoría de Piaget,» de *Infancia y Aprendizaje*, New York, Mussen P.H Edit, 1981, pp. 13-54.
- [6] Papert Seymour and Harel Idit, «Situating constructionism,» *Constructionism*, n° 36, pp. 1-11., 1991.
- [7] M. Montessori, *The Montessori Method*, Primera ed., NEW YORK: Frederick A. Stokes Company, 1912.
- [8] Zuckerman O. , Arida S., and Resnick M. , «Extending Tangible Interfaces for Education: Digital Montessori-inspired Manipulatives,» de *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, 859–868.
- [9] Marshall, P., Rogers, Y., & Hornecker, E., «Are tangible interfaces really any better than other kinds of interfaces?,» de *CHI'07 workshop on Tangible User Interfaces in Context & Theory*, San Jose, California, USA., 2007.
- [10] C. Jayne, «Math Manipulatives Use and Math Achievement of Third-Grade Students,» *ERIC*, p. 35, Mayo 1991.
- [11] E. Ackermann, «Transforming the World,» de *A Learning Zone of One's Own: Sharing Representations and Flow in Collaborative Learning Enviroments*, Amsterdam, IOS Press, 2004, pp. 15-37.
- [12] S. Smith Robbins, «Incommensurate wor (l) ds: epistemic rhetoric and faceted classification of communication mechanics in virtual worlds,» Indiana, 2011.
- [13] «A taxonomy of virtual worlds usage in education,» *British Journal of Educational Technology*, vol. 43, n° 6, pp. 949-964, Noviembre 2012.

- [14] B. R. A., *Designing Virtual Worlds*, New Riders, 2003.
- [15] Ghanbarzadeh R. , Ghapanchi A. H. , Blumenstein M. , and Talaei-Khoei A. , «A Decade of Research on the Use of Three-Dimensional Virtual Worlds in Health Care: A Systematic Literature Review,» *Journal of Medical Internet Research*, vol. 16, n° 2, Febrero 2014.
- [16] D. M. D., «Three-dimensional virtual worlds and distance learning: two case studies of Active Worlds as a medium for distance education,» *British Journal of Educational Technology*, vol. 36, n° 3, p. 439–451, Mayo 2005.
- [17] Hew K.F. , Cheung W.S., «Use of three-dimensional (3-D) immersive virtual worlds in K-12 and higher education settings: a review of the research,» *British Journal of Educational Technology*, vol. 41, pp. 33-55, 2010.
- [18] Freina, L., & Ott, M, «A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State Of The Art and Perspectives,» de *eLearning and Software for Education (eLSE)*, Bucharest, Romania, 2015.
- [19] M. Roussou, «Examining young learners' activity within interactive virtual environments,» de *Proceedings of the 2004 conference on Interaction design and children: building a community* , ACM, 2004.
- [20] J. Detlefsen, «Teaching Middle-School Children Astronomy Using Ego-Centric Virtual Reality,» *The Cosmic Perspective*, 2014.
- [21] Williams-Bell, F. M., Kapralos, B., Hogue, A., Murphy, B. M., & Weckman, E. J. , «Using Serious Games and Virtual,» *Fire Technology*, vol. 50, n° 3, pp. 553-584, Mayo 2014.
- [22] Y. Liu, «Virtual neurosurgical education for image-guided deep brain stimulation neurosurger,» de *Audio, Language and Image Processing (ICALIP), 2014 International Conference* , Shanghai, 2014.
- [23] Gail Jones M. , Childers Gina, Emig Brandon , Chevrier Joël, Tan Hong , Stevens Vanessa, and List Jonathan, «The Efficacy of Haptic Simulations to Teach Students with Visual Impairments About Temperature and Pressure,» *JOURNAL OF VISUAL IMPAIRMENT& BLINDNESS* , vol. 108, n° 1, pp. 55-61, January 2014.
- [24] Jones, M. G., Andre, T., Kubasko, D., Bokinsky, A., Tretter, T., Negishi, A., and Superfine, R., «Remote atomic force microscopy of microscopic organisms: Technological innovations for hands-on science with middle and high school students,» *Science Education*, vol. 88, n° 1, pp. 55-71, January 2004.

- [25] Muñoz Cristóbal J. A., Prieto L. P. , Asensio Pérez J. I. , Martínez Monés A. , Jorrín-Abellán I. M. , and Dimitriadis Y. , «Coming Down to Earth: Helping Teachers Use 3D Virtual Worlds in Across-Spaces Learning Situations,» *Journal of Educational Technology & Society*, vol. 18, nº 1, pp. 13-26, Enero 2015.
- [26] Merchant Z. , Goetz E. T. , Cifuentes L. , Keeney-Kennicutt W., and Davis T. J., «Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis,» *Computers & Education*, vol. 70, p. 29–40, Enero 2014.
- [27] Ishii, H., and Ullmer, B., «Tangible Bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms.,» de *Proceedings of CHI' 97*, Atlanta GA, 1997.
- [28] J. Spicer, «Virtual manipulatives: A new tool for hands-on math,» *Focus Magazine*, pp. 14-15, Abril 2000.
- [29] Mateu, J., X. Alamán, «CUBICA: An Example of Mixed Reality,» *Journal of U. Computer Science (J.UCS)*, vol. 19, nº 17, pp. 2598-2616, 2013.
- [30] Z. Shumin, «User Performance in Relation to 3D Input Device Design,» *Computer Graphics-ACM*, vol. 32, nº 4, pp. 50-54, Noviembre 1998.
- [31] M. Mine, «Working in a virtual world: Interaction techniques used in the chapel hill immersive modeling program.,» North Carolina, 1996.
- [32] Sachs E. , Roberts A. and Stoops D. , «3-Draw: a tool for designing 3D shapes,» *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 11, nº 6, pp. 18-26, 1991.
- [33] Liang J. and Green M. , «JDCAD: a highly interactive 3D modeling system,» *Computers & Graphics*, vol. 18, nº 4, pp. 499-506, 1994.
- [34] Gobbetti E. and Balaguer J.-F., «An integrated environment to visually construct 3D animations,» *Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH 95)*, vol. 395, nº 8, p. 518, 1995.
- [35] Butterworth J. , Davidson A. , Hench S. and Olano T., «“3DM: A Three Dimensional Modeler Using a Head-Mounted Display,» de *Proceedings 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics*, 1992.
- [36] Stoakley R. , Conway M. J. and Pausch R., «Virtual Reality on a WIM: Interactive Worlds in Miniature,» de *Proceedings of CHI '95: the 1995 Conference on Human Factors in Computing Systems* , 1995.
- [37] Mapes D. P. and Moshell J. M., «A TwoHanded Interface for Object Manipulation in

Virtual Environments,» *Presence*, vol. 4, n° 4, pp. 403-416, 1995.

- [38] J. Greer, «usnews,» 22 04 2010. [En línea]. Available:
<http://www.usnews.com/education/blogs/paper-trail/2010/04/22/california-college-loses-second-life-for-a-second-time>. [Último acceso: 18 05 2015].
- [39] Talat Ozyagcilar, «Freescale,» Freescale, 1 2012. [En línea]. Available:
http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4248.pdf. [Último acceso: 10 12 2014].
- [40] C. C., *The art of computer game design*, Berkeley, California: Osborne/McGraw-Hill, 1984.
- [41] Denver, «Learning with videogames,» de *Handbook of Research on Improving Learning and Motivation through Educational Games: Multidisciplinary Approaches: Multidisciplinary Approaches*, IGI Global, 2011.
- [42] Resnick Mitchel , Martin Fred, Berg Robert, Borovoy Rick, Colella Vanessa , Kramer Kwin , Silverman Brian, «Digital Manipulatives: New Toys to Think With,» de *CHI '98 conference*, Cambridge, MA, 1998.
- [43] Pbroks13, «Wikipedia,» 02 10 2009. [En línea]. Available:
https://es.wikipedia.org/wiki/Secci%C3%B3n_c%C3%B3nica. [Último acceso: 16 05 2015].

6. ANEXOS

A. EJEMPLO DE SCRIPT LSL PARA INTERPRETAR SEÑALES DEL MIDDLEWARE

```
integer frec_rotacion=-911;
integer frec_posicion=-900;
float min_pos_y;
float max_pos_y;
vector default_pos;

default
{
    state_entry()
    {
        llListen(frec_rotacion, "", "", "");
        llListen(frec_posicion, "", "", "");
        llListen(-1, "", "", "");
        list params = llGetLinkPrimitiveParams(0,[PRIM_POSITION]);
        default_pos =llList2Vector(params, 0);
        min_pos_y=default_pos.y-7;
        max_pos_y=default_pos.y+7;
    }

    touch_start(integer i)
    {
        vector rotationAngle = <0, 0, 0>;
        rotation rot = llEuler2Rot( rotationAngle );
        llSetLinkPrimitiveParamsFast(0,[ PRIM_ROTATION, rot ]);
        llSetLinkPrimitiveParamsFast(0,[ PRIM_POSITION, default_pos]);
    }

    listen(integer frecuencia, string name, key id, string dC)
    {
        if(frecuencia==frec_rotacion)
        {
            rotation rot_xyzq;
            vector xyz_angles = (vector)dC ;
            vector angles_in_radians = xyz_angles*DEG_TO_RAD;
            rot_xyzq = llEuler2Rot(angles_in_radians);
            list params = llGetLinkPrimitiveParams(0,[PRIM_ROTATION]);
            rotation rot =llList2Rot(params, 0);

            llSetLinkPrimitiveParamsFast(0,[ PRIM_ROTATION,
rot*rot_xyzq ]);

        }
        if(frecuencia==frec_posicion)
        {
```

```

vector xyz_pos = (vector)dC ;

list params = llGetLinkPrimitiveParams(0,[PRIM_POSITION]);
vector pos =llList2Vector(params, 0);

pos=pos+xyz_pos;
if(pos.y>min_pos_y&&pos.y<max_pos_y)
{

    llSetLinkPrimitiveParamsFast(0,[PRIM_POSITION, pos]);

}

}

if(frecuencia== -1)
{
    if(dC=="set")
    {
        list params=
llGetLinkPrimitiveParams(0,[PRIM_POSITION]);
        default_pos =llList2Vector(params, 0);
        min_pos_y=default_pos.y-7;
        max_pos_y=default_pos.y+7;
        llSay(0,"Done");

    }

}

vector COLOR_GREEN = <0.0, 1.0, 0.0>;
float OPAQUE      = 1.0;

list _params = llGetLinkPrimitiveParams(0,[PRIM_ROTATION]);
rotation _rot =llList2Rot(_params, 0);
vector angulos=llRot2Euler(_rot)*RAD_TO_DEG;

if(angulos.x<0)
{
    angulos.x=angulos.x+180;
}

if(angulos.x>=60&&angulos.x<65||angulos.x>=115&&angulos.x<120)
{

llSetText((string)angulos.x+"Parábola",COLOR_GREEN,OPAQUE);
    llSay(-700,"parabola");
}
if(angulos.x>=65&&angulos.x<115)
{

llSetText((string)angulos.x+"Hipérbola",COLOR_GREEN,OPAQUE);
    llSay(-700,"hiperbola");
}

if(angulos.x>=5&&angulos.x<60||angulos.x>=120&& angulos.x<175)
{
    llSetText((string)angulos.x+"Elipse",COLOR_GREEN,OPAQUE);
    llSay(-700,"elipse");
}

```

```
        if(angulos.x>=175&&angulos.x<180||angulos.x>=0 && angulos.x<5)
        {
llSetText((string)angulos.x+"Circunferencia",COLOR_GREEN,OPAQUE );
        llSay(-700,"circunferencia");
        }
    }
}
```


B. TEST DE INTRODUCCIÓN A MUNDOS VIRTUALES

Introducción a los mundos virtuales (OpenSim)

Formulario sobre la sesión introductoria sobre los mundos virtuales

***Obligatorio**

1. **Nombre y Apellidos: ***

.....

2. **Curso: ***

.....

3. **Edad ***

.....

4. **Sexo ***

H(hombre), M (mujer)

.....

5. **¿Conocías los mundos virtuales? ***

Marca solo un óvalo.

☐ Sí

☐ No

6. **¿Habías utilizado anteriormente algún mundo virtual? ***

Mundo virtual: World of Warcraft, Sims, Club Penguin...

Marca solo un óvalo.

☐ Sí

☐ No

7. **¿Te ha gustado la sesión sobre mundos virtuales? ***

Marca solo un óvalo.

☐ Sí

☐ No

8. **¿Te ha parecido fácil usar e interactuar en los mundos virtuales? ***

Marca solo un óvalo.

☐ Sí

☐ No

9. ¿Crees que los mundos virtuales facilita el entendimiento de los ejes de coordenadas X,Y,Z? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No
☐ No lo se

10. ¿Ves difícil cambiar las propiedades de un objeto o prim? *

Cambiar su tamaño, cambiarlo de posición...

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

11. ¿Te gustaría realizar actividades usando los mundos virtuales en clase? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

12. ¿Te gustaría realizar actividades usando los mundos virtuales desde casa? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

13. ¿Crees que los mundos virtuales te facilitarían la enseñanza de Matemáticas? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

14. ¿Ves difícil realizar actividades colaborativas desde los mundos virtuales? *

Por ejemplo, hacer ejercicios con parejas usando vuestros avatares

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

15. Escribe brevemente tus impresiones sobre la sesión realizada *

.....

.....

.....

.....

.....

16. ¿En qué asignaturas te gustaría usar los mundos virtuales? *

.....

.....

.....

.....

.....

C. TEST DE USABILIDAD FLYSTICK

Cuestionario de usabilidad y experiencia del usuario

**Obligatorio*

1. **Nombre ***

2. **Apellidos ***

3. **Sexo ***

Marca solo un óvalo.

☐ Hombre

☐ Mujer

4. **Curso y Grupo ***

5. **¿Los elementos tangibles te permiten cambiar los parámetros de los objetos? ***

Se refiere al cambio de tamaño, color, rotación del objeto...

Marca solo un óvalo.

☐ Sí

☐ No

6. **¿Te ha sido fácil utilizar los elementos tangibles? ***

Marca solo un óvalo.

☐ Sí

☐ No

7. **He encontrado el sistema fácil de VirtualTouch ***

VirtualTouch es el sistema que estará formado tanto por los elementos tangibles como por el mundo virtual y sus actividades

Marca solo un óvalo.

☐ Sí

☐ No

8. **La simulación de las actividades en el mundo virtual han sido demasiado complejas ***

Llevar a cabo las actividades de Geometría en los mundos virtuales
Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

9. **Creo que en líneas generales el sistema se aprende a utilizar rápidamente ***

Aprender a manejar rápidamente tanto los tangibles como los mundos virtuales
Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

10. **Usando el sistema, me he sentido... ***

Aprender a manejar rápidamente tanto los tangibles como los mundos virtuales
Marca solo un óvalo.

- ☐ Relajado
☐ Frustrado

11. **Usando VirtualTouch (sistema), me he sentido... ***

Cabe comentar tus sensaciones utilizando el sistema VirtualTouch
Marca solo un óvalo.

- ☐ Relajado
☐ Frustrado
☐ Tenso
☐ Otros: _____

12. **El esfuerzo realizado para resolver las actividades ha sido... ***

En una escala del 1 al 5 (siendo 1 muy poco y 5 mucho)
Marca solo un óvalo.

	1	2	3	4	5	
Muy poco esfuerzo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Esfuerzo muy alto

13. **¿Te parece original el sistema desarrollado? ***

Indica Si, No y el motivo.

.....
.....
.....
.....
.....

14. ¿Te motiva utilizar VirtualTouch en clase? *

VirtualTouch es el sistema que utiliza tanto los tangibles como el mundo virtual
Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

15. ¿Te gustaría utilizar VirtualTouch desde casa? *

VirtualTouch es el sistema que utiliza tanto los tangibles como el mundo virtual
Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

16. ¿Te has distraído mucho mientras realizas las actividades usando VirtualTouch? *

VirtualTouch es el sistema que utiliza tanto los tangibles como el mundo virtual
Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

17. VirtualTouch, ¿te facilita el trabajo en grupo? *

VirtualTouch es el sistema que utiliza tanto los tangibles como el mundo virtual
Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

18. ¿Has necesitado mucho la ayuda y asistencia del profesor? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No

19. ¿Qué cosas mejorarías de VirtualTouch? *

20. ¿Usarías VirtualTouch en otra asignatura? *

En caso afirmativo indica qué asignatura y que actividades te gustaría realizar

D. TEST DE CÓNICAS

Evaluación: Actividad Cónicas

*Obligatorio

1. Nombre y Apellidos *

.....

2. Curso y grupo *

.....

Sección resultante 1

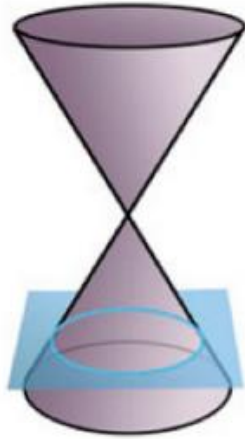


3. Respecto a la sección resultante 1, ¿cuál es el nombre de la curva generada? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Hipérbola
- ☐ Parábola
- ☐ Circunferencia
- ☐ Elipse

Sección resultante 2

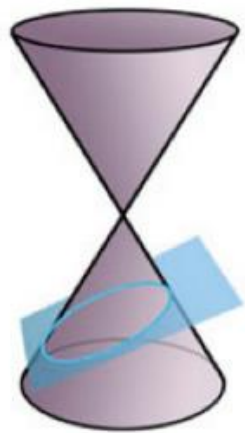


4. Respecto a la sección resultante 2, ¿cuál es el nombre de la curva generada? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Hipérbola
- ☐ Parábola
- ☐ Circunferencia
- ☐ Elipse

Sección resultante 3



5. Respecto a la sección resultante 3, ¿cuál es el nombre de la curva generada? *
- Marca solo un óvalo.*

- ☐ Hipérbola
- ☐ Parábola
- ☐ Circunferencia
- ☐ Elipse

Sección resultante 4



6. Respecto a la sección resultante 4, ¿cuál es el nombre de la curva generada? *
- Marca solo un óvalo.*

- ☐ Hipérbola
- ☐ Parábola
- ☐ Circunferencia
- ☐ Elipse

Curva Generada 1



7. ¿cuál es el nombre de la curva generada 1? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Hipérbola
- ☐ Parábola
- ☐ Circunferencia
- ☐ Elipse

8. La curva generada 1, ¿a qué sección resultante corresponde? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sección Resultante 1
- ☐ Sección Resultante 2
- ☐ Sección Resultante 3
- ☐ Sección Resultante 4

Curva Generada 2



9. ¿cuál es el nombre de la curva generada 2? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Hipérbola
- ☐ Parábola
- ☐ Circunferencia
- ☐ Elipse

10. La curva generada 2, ¿a qué sección resultante corresponde? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sección Resultante 1
- ☐ Sección Resultante 2
- ☐ Sección Resultante 3
- ☐ Sección Resultante 4

Curva Generada 3



11. La curva generada 3, ¿a qué sección resultante corresponde? *

Marca solo un óvalo.

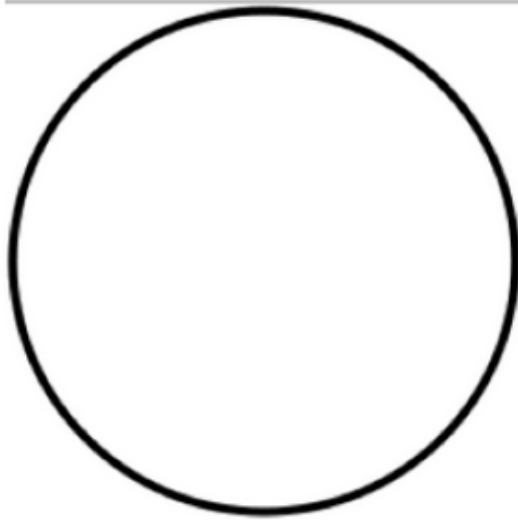
- ☐ Sección Resultante 1
- ☐ Sección Resultante 2
- ☐ Sección Resultante 3
- ☐ Sección Resultante 4

12. ¿cuál es el nombre de la curva generada 3? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Hipérbola
- ☐ Parábola
- ☐ Circunferencia
- ☐ Elipse

Curva Generada 4



13. ¿cuál es el nombre de la curva generada 4? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Hipérbola
- ☐ Parábola
- ☐ Circunferencia
- ☐ Elipse

14. La curva generada 4, ¿a qué sección resultante corresponde? *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sección Resultante 1
- ☐ Sección Resultante 2
- ☐ Sección Resultante 3
- ☐ Sección Resultante 4

E. PREGUNTAS DE ENTREVISTA SEMIESTRUCTURADA CON EL DOCENTE

Pregunta
¿Has utilizado mundos virtuales antes?
¿Has encontrado interesante a la experiencia con <i>FlyStick</i> ?
¿Has requerido soporte técnico para el uso de realidad mixta?
¿Crees que los mundos virtuales pueden ayudar a la enseñanza de matemáticas?
¿Has encontrado difícil de usar al tangible?
¿Has encontrado difícil crear actividades didácticas en el entorno virtual?
¿Cuáles crees que son las mayores ventajas de <i>FlyStick</i> ?
¿Cuáles crees que son las mayores desventajas de <i>FlyStick</i> ?
¿Crees que el estudiante pudo haberse distraído de la actividad?
Valore la experiencia
Valore a <i>FlyStick</i>